

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

FC
2464
K66573
2002
G
THÈSES

**Évolution de l'utilisation du sol de la zone d'influence et de coopération du
Parc national Kouchibouguac par télédétection, photo-interprétation et
intégration dans un système d'information géographique**

Denis Giroux, 1971-
I-1936

BIBLIOTHÈQUE
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.) en géographie

Mars 2002

© Denis Giroux, 2002

Directeur de recherche : Léo Provencher

Membres du jury :

André Poulin (Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke)

Éric Tremblay (Parc national Kouchibouguac, Nouveau-Brunswick)

Résumé

Giroux, D. (2001) **Évolution de l'utilisation du sol de la zone d'influence et de coopération du Parc national Kouchibouguac par télédétection, photo-interprétation et intégration dans un système d'information géographique.** Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 141 p.

Le Parc national Kouchibouguac (PNK), créé en 1969, doit maintenir un programme de monitoring fonctionnel qui lui permettra d'évaluer et de suivre l'état des écosystèmes dans le Parc. Leur état est très dépendant des activités se déroulant en périphérie de celui-ci [i.e. dans la zone d'influence et de coopération (ZIC) du PNK]. L'objectif général de l'étude est d'effectuer une analyse spatio-temporelle de l'évolution de l'utilisation du sol du PNK et de la ZIC du PNK à l'aide de la télédétection satellitaire et des autres technologies disponibles (photographies aériennes, cartes, etc.), sur une période de 16 ans. Des images-satellite MSS et TM de Landsat datant respectivement de 1977 et 1993 furent utilisées. L'intégration des données dans un SIG a permis de cartographier l'utilisation du sol et de calculer les variations de superficies. Les divers traitements effectués sur les deux images nous permettent d'identifier les formes majeures d'utilisation du sol. L'apport complémentaire de la photographie aérienne est toutefois indispensable vu la piètre séparabilité de certaines signatures spectrales et la résolution spatiale insuffisante en milieux fortement morcelés.

On doit regrouper des classes représentant des utilisations du sol que l'on souhaitait cartographier de façon distincte. Sur les images MSS et TM utilisées, le pourcentage de pixels correctement classifiés est particulièrement faible pour le milieu urbanisé. Tant à l'intérieur de la limite du PNK qu'à l'intérieur de la limite de la zone d'influence et de coopération, on observe les plus fortes variations de superficies en milieu forestier (forêt résineuse, forêt feuillue, forêt mixte).

N.B. : Six cédéroms (CD) accompagnent le présent document (voir annexes).

Table des matières

Résumé	
Table des matières.....	i
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des annexes.....	ix
Remerciements.....	x
1. Introduction.....	1
1.1. Problématique.....	1
1.2. Hypothèse.....	5
1.3. Objectifs.....	5
2. Synthèse bibliographique.....	6
2.1. Détection des changements.....	8
2.1.1. Superposition des images.....	9
2.1.2. Seuillage.....	10
2.2. Algorithmes de détection des changements.....	11
2.2.1. Différence d'images.....	11
2.2.2. Rapport d'images.....	13
2.2.3. Comparaison d'indices de végétation.....	15
2.2.4. Comparaison de classification.....	17
2.2.5. Analyse en composantes principales.....	20
2.2.6. Analyse par changement du vecteur spectral.....	22
2.3. Conclusion.....	23
3. Site d'étude.....	25

4. Méthodologie.....	30
4.1. Traitement numérique des deux (2) images-satellite.....	30
4.2. Photo-interprétation et levés de terrain.....	35
4.3. Intégration dans le SIG	36
4.4. Analyse et interprétation des résultats.....	36
5. Analyse des résultats.....	37
5.1. Analyse qualitative des classes par photographies aériennes et images-satellite.....	57
5.2. Analyse de la répartition des types d'utilisations du sol par imagerie satellitaire.....	103
5.3. Analyse de la fragmentation des habitats par imagerie satellitaire...	120
6. Interprétation des résultats.....	121
7. Conclusion et recommandations.....	124
Références.....	126
Annexes.....	130

Liste des figures

Figure 1 - Analyse par changement du vecteur spectral.....	23
Figure 2 - Localisation du parc national Kouchibouguac (PNK).....	27
Figure 3 - Limites du Parc national Kouchibouguac, des bassins versants et de la portion étudiée de la zone d'influence et de coopération (ZIC).....	28
Figure 4 - Organigramme méthodologique.....	31
Figure 5 - Superposition du réseau routier vectoriel sur l'image MSS de Landsat (1977).....	33
Figure 6 - Superposition du réseau routier vectoriel sur l'image TM de Landsat (1993).....	34
Figure 7 - Répartition de la forêt feuillue et résineuse au sud-est de l'image MSS de Landsat.....	53
Figure 8 - Répartition de la forêt feuillue et résineuse au sud-est de l'image TM de Landsat.....	54
Figure 9 - Aperçu des classes distinguables sur une photographie aérienne au 1:40 000 dans le secteur de Saint-Louis-de-Kent. Photo aérienne A26690 - 62. (1985).....	56
Figure 10 - Forêt résineuse. Secteur du Pré à Germain (Le Barachois). Photos aériennes A31729 - 11 et A31729 - 12. (1995).....	58
Figure 11 - Forêt résineuse. Secteur du Pré à Germain (Le Barachois). Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	60
Figure 12 - Forêt résineuse. Secteur du Pré à Germain (Le Barachois). Image TM de Landsat classifiée (1993).....	61
Figure 13 - Forêt feuillue. Péninsule d'Aldouane (sud du PNK). Photos aériennes A31728 - 118 et A31728 - 119. (1995).....	63
Figure 14 - Forêt feuillue. Péninsule d'Aldouane (sud du PNK). Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	64
Figure 15 - Forêt feuillue. Péninsule d'Aldouane (sud du PNK). Image TM de Landsat classifiée (1993).....	65

Figure 16 - Forêt mixte. Secteur South Kouchibouguac. Photos aériennes A31728 - 82 et A31728 - 108 . (1995).....	67
Figure 17 - Forêt mixte. Secteur South Kouchibouguac. Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	68
Figure 18 - Forêt mixte. Secteur South Kouchibouguac. Image TM de Landsat classifiée (1993).....	69
Figure 19 - Régénération forestière. Secteur au nord du village de Kouchibouguac, à l'ouest de la limite du PNK. Photo aérienne A30954 - 162 . (1974).....	71
Figure 20 - Régénération forestière. Secteur au nord du village de Kouchibouguac, à l'ouest de la limite du PNK. Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	72
Figure 21 - Régénération forestière. Secteur Black River (limite ouest du PNK). Photo aérienne A31728 - 143. (1995).....	73
Figure 22 - Régénération forestière. Secteur Black River (limite ouest du PNK). Image TM de Landsat classifiée (1993).....	74
Figure 23 - Milieu agricole. Secteur du village de Saint-Charles. Photo aérienne 73023 - 172. (1973).....	76
Figure 24 - Milieu agricole. Secteur du village de Saint-Charles. Image MSS de Landsat classifiée.(1977).....	77
Figure 25 - Milieu agricole. Secteur du village de Saint-Charles. Image TM de Landsat classifiée (1993).....	78
Figure 26 - Coupes forestières. Secteur Saint-Ignace Siding. Photo aérienne 73034 - 141. (1973).....	80
Figure 27 - Coupes forestières. Secteur Saint-Ignace Siding. Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	81
Figure 28 - Coupes forestières. Secteur à mi-chemin entre St-Margarets et la limite ouest du PNK. Photo aérienne A26690-138. (1985).....	82
Figure 29 - Coupes forestières. Secteur à mi-chemin entre St-Margarets et la limite ouest du PNK. Image TM de Landsat classifiée (1993).....	83

Figure 30 - Sol nu. Secteur Saint-Charles Station. Photos aériennes 73037 - 39 et 73037 - 100 . (1973).....	85
Figure 31 - Sol nu. Secteur Saint-Charles Station. Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	86
Figure 32 - Sol nu. Secteur de Pointe-Sapin. Photo aérienne A26690 - 210. (1985).....	87
Figure 33 - Sol nu. Secteur Pointe-Sapin. Image TM de Landsat classifiée (1993).....	88
Figure 34 - Milieu humide. Secteur Rivière-au-Portage. Photo aérienne A31729 - 8. (1995).....	90
Figure 35 - Milieu humide. Secteur Rivière-au-Portage. Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	91
Figure 36 - Milieu humide. Secteur Rivière-au-Portage. Image TM de Landsat classifiée (1993).....	92
Figure 37 - Dunes, plages et hauts-fonds. Secteur Baie de St-Louis (Dune Richibucto Nord). Photo aérienne A31596 - 88. (1991).....	94
Figure 38 - Dunes, plages et hauts-fonds. Secteur Baie de St-Louis (Dune Richibucto Nord). Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	95
Figure 39 - Dunes, plages et hauts-fonds. Secteur Baie de St-Louis (Dune Richibucto Nord). Image TM de Landsat classifiée (1993).....	96
Figure 40 - Milieu urbanisé et sols nus. Village de Grande-Aldouane. Photos aériennes A30953 - 37 et A30954 - 123. (1974).....	98
Figure 41 - Milieu urbanisé et sols nus. Village de Grande-Aldouane. Image MSS de Landsat classifiée (1977).....	99
Figure 42 - Milieu urbanisé et sols nus. Village de Grande-Aldouane. Photo aérienne A31596 - 182. (1991).....	100
Figure 43 - Milieu urbanisé et sols nus. Village de Grande-Aldouane. Image TM de Landsat classifiée (1993).....	101
Figure 44 - Occupation du sol en 1977 (forêt résineuse, forêt feuillue et forêt mixte).....	106

Figure 45 - Occupation du sol en 1993 (forêt résineuse, forêt feuillue et forêt mixte).....	107
Figure 46 - Occupation du sol en 1977 (milieu agricole).....	109
Figure 47 - Occupation du sol en 1993 (milieu agricole).....	110
Figure 48 - Occupation du sol en 1977 (régénération, coupes forestières et sols nus).....	112
Figure 49 - Occupation du sol en 1993 (régénération, coupes forestières et sols nus).....	113
Figure 50 - Occupation du sol en 1977 (milieu humide, dunes et plages, eau).....	115
Figure 51 - Occupation du sol en 1993 (milieu humide, dunes et plages, eau).....	116
Figure 52 - Occupation du sol en 1977 (milieu urbanisé et sols nus).....	118
Figure 53 - Occupation du sol en 1993 (milieu urbanisé et sols nus).....	119
Figure 54 - Occupation du sol en 1977 (portion d'image étudiée). Toutes les classes.....	133
Figure 55 - Occupation du sol en 1993 (portion d'image étudiée). Toutes les classes.....	134
Figure 56 - Occupation du sol en 1977 (bassins versants du PNK). Toutes les classes.....	135
Figure 57 - Occupation du sol en 1993 (bassins versants du PNK). Toutes les classes.....	136
Figure 58 - Occupation du sol en 1977 (à l'intérieur du PNK). Toutes les classes.....	137
Figure 59 - Occupation du sol en 1993 (à l'intérieur du PNK). Toutes les classes.....	138
Figure 60 - Occupation du sol en 1977 (portion d'image étudiée). Toutes les classes. (Carte grand format dans une pochette).....	139
Figure 61 - Occupation du sol en 1993 (portion d'image étudiée). Toutes les classes. (Carte grand format dans une pochette).....	139
Figure 62 - Zones de changements d'utilisation du sol (de 1977 à 1993) à partir des images-satellite MSS (1977) et TM (1993) de Landsat. (Carte grand format dans une pochette).....	140

Figure 63 - Fragmentation des habitats. Image MSS de Landsat (1977). (Carte grand format dans une pochette).....	141
Figure 64 - Fragmentation des habitats. Image TM de Landsat (1993). (Carte grand format dans une pochette).....	141

Liste des tableaux

Tableau 1 - Description des classes obtenues initialement sur l'image TM de Landsat.....	39
Tableau 2 - Description des classes finales des images TM et MSS de Landsat.....	40
Tableau 3 - Pourcentage de pixels correctement classifiés sur les images MSS(1977) et TM (1993) de Landsat complètes.....	41
Tableau 4 - Superficie et pourcentage de changement pour chacune des classes d'utilisation du sol en 1977 et 1993, à l'intérieur du PNK.....	43
Tableau 5 - Superficie et pourcentage de changement pour chacune des classes d'utilisation du sol en 1977 et 1993, à l'intérieur des bassins versants communs au PNK et à la ZIC.....	48
Tableau 6 - Fichiers sur le disque compact (CD-ROM) joint à ce document....	130

Liste des annexes

Annexe 1 - Fichiers sur le disque compact (CD-ROM) joint à ce document.....	130
Annexe 2 - Cartes d'utilisation du sol en 1977 et 1993 pour la portion de la ZIC étudiée, les bassins versants et le PNK.....	132
Annexe 3 - Cartes (grand format) des classifications finales des images-satellite MSS (1977) et TM (1993) de Landsat	139
Annexe 4 - Carte (grand format) des zones de changements d'utilisation du sol (de 1977 à 1993) à partir des images-satellite MSS (1977) et TM (1993) de Landsat	140
Annexe 5 - Cartes (grand format) de la fragmentation des habitats pour les images-satellite MSS (1977) et TM (1993) de Landsat.....	141

Remerciements

Cette étude a été rendue possible grâce à la collaboration entre le Parc national Kouchibouguac (Nouveau-Brunswick) et le Département de géographie et télédétection de l'Université de Sherbrooke.

Des remerciements sont de mise pour mon directeur de mémoire, M. Léo Provencher, pour ses nombreux conseils, critiques et suggestions. Les conseils de MM. André Poulin et Michel Rheault furent aussi grandement appréciés, particulièrement lors des premières étapes de ce projet de recherche. Je tiens également à remercier M. Éric Tremblay, écologiste en chef au PNK, pour m'avoir donné l'opportunité d'effectuer cette étude, pour ses recommandations, et pour l'aide matérielle (hébergement, GPS, photographies aériennes, cartes, etc.) gracieusement fournie lors des travaux sur le terrain. La collaboration de MM. Marco Dussault et Olivier Bérard, responsables de la base de données géospatiales du PNK, fut aussi grandement appréciée.

Finalement, les remerciements ne seraient pas complets sans souligner combien j'ai apprécié le support et l'encouragement que j'ai reçu de ma famille, de ma conjointe, Annie, et l'oreille attentive de plusieurs amis, témoins des hauts et des bas rencontrés lors de la réalisation de ce projet.

1. Introduction

1.1 Problématique

Le Parc national Kouchibouguac (PNK) a été créé en 1969 dans le but de préserver un échantillon représentatif du paysage canadien (Desloges, 1979). Comme le mentionne la Loi sur les parcs nationaux, la priorité du Service canadien des Parcs, en ce qui a trait à la gestion d'un parc national, est de «préserver l'intégrité écologique et, à cette fin, protéger les ressources naturelles» (Environnement Canada, 1993, p. 12). L'intégrité écologique peut être définie comme «un état dans lequel la structure et la fonction de l'écosystème ne sont pas altérées par des agressions d'origine humaine et sont ainsi susceptibles de persister à long terme.» (Environnement Canada, 1993, p. 12).

Selon le *Ecosystem Conservation Plan* du PNK (Tremblay et Beach, 1994), un des buts généraux du plan de conservation de l'écosystème du Parc est de préserver, au sein de l'écosystème régional, l'intégrité des habitats qui le composent et les composantes physiques et biologiques qui l'auto-régularisent. Pour atteindre ses objectifs, le PNK doit maintenir un programme de monitoring fonctionnel qui lui permettra d'évaluer et de suivre l'état de l'écosystème dans le Parc. Le monitoring écologique est considéré comme un élément-clé dans les efforts de maintien de l'intégrité écologique du Parc. Sans monitoring, il est impossible de déterminer s'il y a une ou des déviations par rapport aux normes écologiques (Tremblay et Beach, 1994).

Les écosystèmes situés à l'intérieur des limites du PNK ne sont pas des systèmes fermés. Le Parc n'est pas un îlot immunisé aux influences extérieures par ses frontières. Comme le PNK n'est qu'une portion de l'écosystème, il est évident que les conditions des écosystèmes compris dans le Parc sont très dépendantes des activités se déroulant en périphérie de celui-ci. Les limites des écosystèmes ne suivent pas les limites légales du Parc (Tremblay et Beach, 1994). Pour atteindre leur but de

préservation, les gestionnaires du PNK doivent donc tenir compte des activités environnantes.

Selon le *Ecosystem Conservation Plan* du PNK (Tremblay et Beach, 1994), le Grand Écosystème de Kouchibouguac est la huitième priorité de gestion sur un total de 18. Ruel (1999) a introduit la notion de **zone d'influence et de coopération** (ZIC) plutôt que Grand Écosystème; nous utiliserons donc ces termes dans cette étude. L'énoncé du problème relié à la ZIC, tel qu'exposé dans le plan de conservation des écosystèmes, est que les diverses utilisations du sol à l'extérieur des limites du PNK risquent d'affecter l'état de santé de l'écosystème du Parc (Tremblay et Beach, 1994). Le PNK est légèrement incliné vers l'océan et est parcouru par quelques rivières qui s'écoulent lentement vers l'océan où elles créent des lagunes peu profondes en plusieurs endroits. Presque tous les bassins versants présents dans le Parc ont leur source bien au-delà des limites du PNK. Ces caractéristiques territoriales expliquent pourquoi on doit tenir compte des activités se déroulant à l'extérieur du PNK.

L'énoncé du problème en ce qui a trait à la santé de l'écosystème, est que les stress et les menaces environnementales peuvent compromettre l'état de santé des écosystèmes que le PNK protège. Le suivi environnemental de l'état des écosystèmes doit donc être effectué régulièrement et sur une longue période (Tremblay et Beach, 1994). Le projet présenté ici s'inscrit dans le mode de gestion des écosystèmes, basé sur le concept de zone d'influence écologique (Ruel, 1999), préconisé par les gestionnaires du PNK.

Dans le passé, la philosophie de gestion des parcs nationaux visait la protection du territoire sans se préoccuper de ce qui se déroulait de l'autre côté de ses limites légales. La nouvelle approche de Parcs Canada dans la gestion des parcs consiste en une "gestion de l'écosystème" où l'on ne tient pas uniquement compte du secteur protégé mais de ce qui se déroule au-delà de ses limites. C'est une philosophie d'anticipation et de prévention (Tremblay & Beach, 1994). Selon le Plan de gestion du

PNK, «la gestion des écosystèmes de Kouchibouguac ne peut s'effectuer sans tenir compte des milieux environnants et des différentes utilisations des sols qui s'y pratiquent» (Environnement Canada, 1993, p. 20).

L'objectif de la gestion de la ZIC du PNK, tel que mentionné dans le *Ecosystem Conservation Plan* (Tremblay et Beach, 1994), est d'établir un forum d'échange d'idées entre les différents intervenants. Une base de données des plus complète est donc essentielle si l'on veut développer une approche intégrée de gestion des ressources naturelles et de protection de l'écosystème. Cette approche permettra d'offrir la meilleure protection possible à l'écosystème du PNK et de suivre son évolution. Une base de données à jour favorisera une meilleure connaissance des divers types d'utilisation du sol dans l'écosystème.

Actuellement, peu de renseignements sont disponibles sur les changements d'utilisation du sol survenus en périphérie du PNK depuis sa création en 1969. On commence seulement à tenir compte des activités se déroulant à l'extérieur de ses limites. Le projet présenté ici vise à combler, en partie, cette lacune. Une étude concernant les activités se déroulant en périphérie du PNK a été complétée récemment. Il s'agit de celle de Ruel (1999), portant sur la gestion des risques environnementaux dans la zone d'influence et de coopération du PNK.

Selon le document de Desloges (1979), le PNK comprend huit habitats principaux: les forêts (52 %), les prairies (4 %), les tourbières (21 %), les marais salés (3 %), le cordon littoral (2 %), le système estuarien (18 %), les systèmes d'eau douce (moins de 1 %) et finalement l'environnement marin. Quels habitats retrouve-t-on à l'extérieur du Parc (dans la ZIC)? Quel pourcentage de la ZIC représente chacun? Est-ce que la superficie de ces habitats a varié? Est-ce que les types d'utilisation du sol ont changé? Ce sont, globalement, les questions auxquelles tente de répondre cette étude.

L'approche méthodologique s'appuie sur l'utilisation de la télédétection satellitaire. En effet, celle-ci constitue une alternative et un complément intéressant à l'utilisation de photographies aériennes seules. La télédétection permet une analyse homogène de la zone d'étude à un coût raisonnable. Toutefois, les seules données de télédétection disponibles, ayant une résolution spatiale satisfaisante et prises à une époque appropriée (i.e. aussi près que possible de la date de création du PNK), proviennent du capteur MSS (*multispectral scanner*) du satellite Landsat-2, en 1977. La résolution spatiale des images provenant de ce capteur est de 80 mètres par 80 mètres. En tenant compte de ce fait (la résolution spatiale de 80 m), la télédétection satellitaire est peu efficace pour établir l'utilisation du sol dans les milieux fortement morcelés. De plus, comme l'a démontré l'étude d'Aménatech (1995), l'image TM de 1993 d'une résolution de 30 m est également limitée en ce qui a trait à la différenciation de certains types d'utilisation du sol. Les photographies aériennes sont donc utilisées de façon complémentaire pour les milieux où la télédétection est peu performante pour chacune des images. En dernier recours, tout document permettant de déterminer l'utilisation passée du sol sera utilisé.

Pour effectuer un monitoring efficace dans le cadre de la gestion du PNK, une méthode spécifique d'identification et d'analyse à l'aide d'un SIG (système d'information géographique) est requise. Cette méthode doit toutefois tenir compte des limites des technologies disponibles et des besoins des gestionnaires.

1.2. Hypothèse

À partir de la problématique exposée ci-dessus, on avance l'hypothèse suivante:

- il est possible de distinguer et de délimiter les différentes formes d'utilisation du sol de la ZIC du PNK, en vue de déceler les changements spatio-temporels, par l'analyse multitemporelle d'images MSS et TM de Landsat et par l'apport complémentaire de la photographie aérienne.

1.3. Objectifs

À partir de la problématique formulée précédemment, découlent un objectif général et trois (3) objectifs spécifiques.

Objectif général:

L'objectif général de cette recherche est d'effectuer une analyse spatio-temporelle permettant de déceler, dans l'espace et dans le temps, l'utilisation du sol de la ZIC du PNK à l'aide de la télédétection et des autres technologies disponibles (photographies aériennes, cartes, etc.), et d'intégrer ces données dans un SIG; ceci dans le but d'identifier les tendances de l'évolution dans l'utilisation du sol à l'intérieur des limites du PNK, des bassins versants et de la ZIC au cours des 16 dernières années.

Objectifs spécifiques:

Les trois (3) objectifs spécifiques sont :

- d'identifier, par télédétection, les formes d'utilisation du sol et leur répartition spatiale dans la ZIC du PNK pour les années 1977 et 1993;
- d'établir les limites d'utilisation des capteurs MSS et TM de Landsat pour la différenciation des types d'utilisation du sol, et établir où les photographies aériennes (ou tout autre document) s'avèrent indispensables. Il s'agit de démontrer les limites des différentes technologies disponibles;
- d'intégrer les données dans un SIG afin de mettre en évidence les changements survenus dans l'utilisation du sol.

Le projet présente donc trois aspects bien distincts: le traitement numérique des images, l'interprétation par photographies aériennes et l'intégration de l'information extraite dans un SIG.

2. Synthèse bibliographique

Cette synthèse bibliographique aborde les différentes techniques (algorithmes) de détection des changements d'utilisation du sol par télédétection. Elle traite des algorithmes qui semblent les plus couramment utilisés. Les techniques telles que la différence d'images, le rapport d'images, la comparaison d'indices de végétation, la comparaison de classification, l'analyse en composantes principales et, finalement, l'analyse par changement du vecteur spectral seront succinctement analysées. Des notions de superposition d'images et de seuillage sont également abordées.

Avant le développement des capteurs de télédétection spatiaux ou aéroportés actuels, la photographie aérienne était probablement un des meilleurs outils permettant d'observer facilement l'ensemble d'un territoire et de suivre son évolution. Toutefois, la comparaison visuelle de photographies aériennes peut rapidement devenir une tâche longue et fastidieuse, particulièrement si le territoire étudié est d'une grande superficie. Les données satellitaires peuvent contribuer à résoudre ce problème. Grâce à leur nature numérique, elles peuvent être utilisées pour mettre en corrélation et comparer les changements (Jensen, 1986).

La détection des changements est le processus d'identification des différences d'un objet en l'observant à différents moments. La couverture répétée des mêmes secteurs dans le temps permet de déceler les changements (Singh, 1989). Les techniques de détection des changements peuvent être appliquées dans divers domaines tels l'analyse des changements d'utilisation du sol, le suivi de la rotation des cultures, l'évaluation de la déforestation, l'étude des changements phénologiques de la végétation, les variations saisonnières de la productivité des champs, la détection du

stress sur les cultures, le suivi des catastrophes (causes naturelles ou humaines), l'évaluation de la fonte des neiges, les variations thermiques journalières ainsi que d'autres changements environnementaux.

Le rythme de changement est le principal élément à considérer lorsque l'on traite de la détection des changements (Thompson *et al.*, 1982). La notion de "changement lent" ou de "changement rapide" est très relative. Thompson *et al.* (1982) suggère quatre (4) types de changements: saisonnier, à long terme, à court terme et constant. Les changements "constants" pourraient aussi être qualifiés de "changements dynamiques".

Les changements de type saisonnier sont ceux où une série d'événements connus se déroule selon un ordre logique et cohérent. Ces événements se déroulent ou se répètent au cours d'une même année. Les changements à long terme sont lents et peu fréquents. La zone influencée est souvent relativement petite (e.g. le changement du cours d'une rivière). Du point de vue de Landsat, ce sont des changements qui sont pratiquement permanents et qui surviennent sur une période de un à dix ans et même davantage (Thompson *et al.*, 1982). Vogelmann (1988), dans son étude sur la détection des changements forestiers en haute altitude, considère une période de onze (11) années comme étant du "long terme". Les changements à court terme ne sont pas saisonniers. Leur durée est de quelques jours à quelques mois ou simplement de quelques heures dans le cas des températures. Le changement se produit, mais la nature revient assez rapidement à son état initial. Les inondations sont un exemple de changements à court terme. Les changements constants sont ceux qui se produisent lorsque l'eau transporte, par exemple, des matériaux tels la glace ou des sédiments. Dans ce contexte, l'environnement change constamment (Thompson *et al.*, 1982). Ce sont des milieux dynamiques.

Selon Jensen (1986), le choix de la technique appropriée de détection des changements s'appuie sur l'analyse de plusieurs facteurs importants. Premièrement,

l'analyste doit connaître les caractéristiques culturelles et biophysiques de la zone étudiée. Deuxièmement, il est essentiel de connaître avec précision la date d'acquisition des différentes images. Troisièmement, l'analyste doit connaître les caractéristiques (i.e. forces et faiblesses) des différents algorithmes et leurs substituts, ainsi que leur degré de flexibilité. Comme le mentionne Campbell (1987), une connaissance approfondie de la zone d'étude est essentielle afin de choisir la ou les techniques de détection des changements qui conviennent le plus au secteur étudié.

Avant de traiter des différents algorithmes de détection des changements, quelques notions relatives à la détection des changements, à la superposition d'images et au seuillage sont abordées.

2.1. Détection des changements

La prémisses de base lors de l'utilisation de la télédétection, pour la détection des changements, est que les changements d'utilisation du sol ou du couvert végétal résultent en des variations des valeurs de radiance, et que ces variations de radiance attribuables aux changements d'occupation du sol sont importantes par rapport aux variations de radiance causées par d'autres facteurs comme les fluctuations des conditions atmosphériques, les variations d'angle d'éclairement du soleil et d'humidité du sol (Singh, 1989). Il y a donc des changements au niveau de la signature spectrale des objets ou, plus généralement, de la quantité de rayonnement réfléchi ou émis dans diverses portions du spectre électromagnétique.

Jensen (1986) a identifié cinq (5) conditions à respecter si l'on désire analyser les caractéristiques spatiales, spectrales et temporelles des données satellitaires afin d'obtenir des résultats sur les changements d'utilisation du sol et produire des cartes représentant ces changements. Selon cet auteur, une méthode de détection des changements doit être basée sur un capteur qui:

- 1) survole les mêmes secteurs de façon systématique (répétitivité);

- 2) enregistre les données d'une même région géographique au même moment de la journée afin de minimiser les effets dus à l'angle d'éclairement solaire;
- 3) conserve les mêmes échelles et angles d'observation;
- 4) minimise le déplacement du relief (particulièrement dans le domaine de la télédétection par capteurs radars); et
- 5) enregistre le flux énergétique réfléchi dans les régions spectrales appropriées.

Les conditions suggérées par cet auteur sont des conditions idéales. Dans la réalité, il est difficile de satisfaire à toutes ces conditions.

2.1.1. Superposition des images

Les images servant à la détection des changements doivent être superposées de façon très précise (Jensen, 1986). Les images peuvent être des données, brutes ou traitées, ou encore des classifications d'images acquises à deux dates différentes. Les corrections géométriques doivent permettre de superposer les deux images avec moins d'un quart ($\frac{1}{4}$) à un demi ($\frac{1}{2}$) pixel de décalage (Jensen, 1986). Un décalage plus grand risque d'entraîner l'identification de faux secteurs de changements (Jensen, 1986). Idéalement, les images sont superposées à l'aide d'une projection cartographique standard (Jensen, 1986).

Pour permettre la détection de changements à partir de deux (2) images n'ayant pas la même résolution, on doit ré-échantillonner celles-ci afin d'avoir des pixels de dimension identique. Fung et LeDrew (1987) ont eu recours au ré-échantillonnage d'images TM et MSS en milieu péri-urbain. Malgré l'utilisation de nombreux points d'appui pour la correction géométrique des images, la superposition des images est restée imparfaite. Toutefois, le décalage est toujours demeuré inférieur à un (1) pixel. La superposition imparfaite était particulièrement évidente le long des éléments linéaires tels que les rivières et ce, surtout lors de la superposition des bandes infrarouges des images ré-échantillonnées. Selon ces auteurs, cet effet serait partiellement attribuable à la différence de largeur de ces éléments dans chacune des

images TM et MSS. Le problème serait particulièrement visible lorsque des données MSS (résolution initiale de 80 m) sont ré-échantillonnées à 30 m. Le décalage peut alors varier de moins d'un pixel jusqu'à deux pixels (Fung et LeDrew, 1987).

2.1.2. Seuillage

Les techniques de détection des changements sont caractérisées par le processus de transformation des données (s'il y a lieu) et les techniques d'analyse utilisées pour délimiter les zones où il y a des changements significatifs (Singh, 1989). Il y a deux approches de base pour la détection des changements. Premièrement, l'analyse comparative de classifications produites de façon indépendante pour les images prises à des dates différentes. Deuxièmement, l'analyse simultanée de données multitemporelles (Singh, 1989).

Pour la plupart des techniques de détection des changements, on doit décider où l'on fixera les limites du seuil séparant les zones de changement par rapport aux zones intactes. Par exemple, si une image $I(x,y)$ montre des éléments de couleur claire (changements) sur un fond plus foncé (aucun changement), alors ces éléments peuvent être extraits par le seuillage suivant (note : le choix de couleur est arbitraire; on pourrait montrer les secteurs de changements en noir et les secteurs intacts par une couleur claire) :

$$\begin{aligned} I(x,y) &= 1 \text{ si } I(x,y) > T \\ \text{ou} \\ I(x,y) &= 0 \text{ si } I(x,y) \leq T \end{aligned}$$

où T est la valeur de seuil déterminée empiriquement ou statistiquement par l'analyste. Les pixels représentant les changements prennent la valeur 1, et l'arrière-plan prend la valeur zéro. Si l'on désire définir plus d'un seuil, on peut utiliser la technique de division par densité (*density slicing*). Dans cette méthode, les différents niveaux de gris sont regroupés par tranches prédéfinies. Une connaissance *a priori* ou une interprétation visuelle du secteur représenté sur l'image est souhaitable afin de

choisir des seuils significatifs (Singh, 1989). L'histogramme de l'image des changements peut aussi servir à déterminer ces seuils (Singh, 1989).

2.2. Algorithmes de détection des changements

Cette synthèse bibliographique traite principalement de la détection des changements d'utilisation du sol par télédétection. Il existe plusieurs techniques (ou algorithmes) de détection des changements. Elle ne présente que les algorithmes qui semblent les plus utilisés. Elle aborde plus particulièrement la détection des changements pour les portions visible et proche-infrarouge du spectre électromagnétique. Ce n'est donc pas une liste exhaustive des algorithmes. Les techniques suivantes seront abordées: différence d'images, rapport d'images, comparaison d'indices de végétation, comparaison de classification, analyse en composantes principales, et finalement, analyse par changement du vecteur spectral. Ces algorithmes produisent souvent des résultats différents même s'ils sont utilisés dans le même environnement, plus précisément avec les mêmes images.

2.2.1. Différence d'images (*univariate image differencing*)

Selon cette technique, les images superposables acquises aux temps t_1 et t_2 sont soustraites l'une de l'autre, pixel par pixel. On obtient ainsi une nouvelle image qui représente les changements. Cette opération s'exprime mathématiquement ainsi:

$$Dx_{ij}^k = x_{ij}^k(t_2) - x_{ij}^k(t_1) (+ C)$$

où x_{ij}^k est la valeur du pixel de la bande k pour le pixel x de la rangée i et de la colonne j au temps t_1 (première date) ou t_2 (deuxième date). Certains auteurs additionnent une constante (C) qui permet d'obtenir seulement des valeurs positives (Singh, 1989; Jensen, 1986). Les données d'entrée peuvent provenir d'images brutes ou de données filtrées (Singh, 1989).

La soustraction d'images produit une distribution (un histogramme) des différences entre les deux (2) bandes. On obtient une courbe approximativement normale si tout le territoire couvert par l'image n'a pas complètement changé et s'il n'y a pas de fortes variations sur de grandes portions de l'image. Les pixels qui n'ont pas ou peu variés d'une date à l'autre se retrouvent au centre de la courbe (i.e. la moyenne) tandis que les pixels qui ont subi des variations se retrouvent aux extrémités de la distribution. L'élément crucial de cette méthode est l'endroit où l'on fixe les seuils séparant les pixels représentant les zones de changements de ceux représentant les zones intactes. Une valeur d'un (1) écart-type à partir de la moyenne est souvent choisie et vérifiée de façon empirique pour déterminer si ce sont les seuils optimaux. Un analyste connaissant bien le secteur étudié pourra plus facilement établir les meilleurs seuils (Jensen, 1986).

La différence d'images est la technique la plus utilisée pour la détection des changements (Singh, 1989). Weismiller *et al.* (1977) ont utilisé la différence d'image (*delta data change detection*) sur des images MSS de Landsat en milieu côtier. Ils jugent que cette méthode a été relativement performante malgré le fait que plusieurs petits secteurs de changements n'aient pas été identifiés avec précision. Ils affirment aussi que la différence d'images est peut-être trop simple pour faire face adéquatement à tous les facteurs impliqués dans la détection des changements sur des images. Il y aurait, selon eux, une perte d'information lors du processus de soustraction car il ne reste que les différences des quatre bandes par rapport aux deux groupes de quatre bandes (MSS) que l'on avait au départ. Malheureusement, Weismiller *et al.* (1977) n'expliquent pas le mécanisme causant la perte d'information qu'ils supposent. Toutefois, selon ces mêmes auteurs, l'image créée peut être utile pour évaluer qualitativement les changements par interprétation d'images. Jensen (1986) affirme que la détection des changements par différence d'images est l'un des algorithmes les plus précis, mais qu'il n'est pas également efficace pour détecter tous les types de changements d'utilisation du sol. De plus, comme il est possible d'obtenir une même différence de niveaux de gris à partir de niveaux de gris différents

(e.g. $140 - 110 = 30$ et $50 - 20 = 30$), Singh (1989) considère qu'il y a une perte potentielle d'information si l'on effectue une simple transformation par différence.

2.2.2. Rapport d'images (*image ratioing* ou *ratio*)

Le rapport d'images est considéré comme étant une technique relativement rapide et simple d'identification des changements (Howarth et Wickware, 1981, Howarth & Boasson, 1983). Cette méthode utilise deux images superposables acquises à des dates différentes. On divise les valeurs d'intensités enregistrées pour les pixels d'une bande d'une image par les intensités de la même bande de l'autre image. On considère ici qu'il n'y a pas de variations atmosphériques ou phénologiques entre les deux dates. Les données sont ensuite comparées pixel par pixel. Mathématiquement, cette opération s'exprime ainsi:

$$Rx_{ij}^k = \frac{x_{ij}^k(t_1)}{x_{ij}^k(t_2)}$$

où $x_{ij}^k(t_2)$ est la valeur du pixel de la bande k pour le pixel x de la rangée i et de la colonne j au temps t_2 (Singh, 1989). Lorsque les intensités de réflectance sont similaires pour les deux images, le résultat de la division tend vers un (1). Cela signifie que l'utilisation du sol n'a pas (ou très peu) changé dans le secteur donné. Dans les secteurs où il y a eu des changements, le résultat de la division sera significativement plus grand ou plus petit que un (1), selon la nature du changement de réflectance entre les deux dates (Howarth et Wickware, 1981). Comme dans la technique de différence d'images, l'élément critique du rapport d'images est la sélection des valeurs de seuils appropriées dans les extrémités de la distribution représentant les pixels ayant changé de valeur. Jensen (1986) et Singh (1989) affirment que, souvent, on sélectionne arbitrairement des seuils et on les vérifie empiriquement pour déterminer si ce sont les seuils optimaux.

Les changements des conditions d'observation (e.g. l'ombre, les variations de l'angle d'éclairement du soleil selon les saisons, etc.) peuvent affecter la précision de l'identification des éléments présents sur les images. Les rapports de bandes permettent de standardiser les variations d'illumination (Jensen, 1986). Par exemple, pour un niveau de gris de 16 pour la bande 1 et de 20 pour la bande 2, on obtient un rapport de 0,8 (soit $16/20$). On obtiendra également un rapport de 0,8 pour un niveau de gris de 20 pour la bande 1 et de 25 pour la bande 2 (soit $20/25$). Ces différents niveaux de gris dont les quotients du rapport de bandes sont identiques peuvent être observés si l'élément (e.g. un versant montagneux) est illuminé directement et indirectement à cause de l'orientation opposée, par rapport au soleil, des surfaces de cet élément. Les effets attribuables à la topographie sont donc annulés par le rapport des niveaux de gris, permettant ainsi la reconnaissance de classes spectrales distinctes (Campbell, 1987).

Fung et Zhang (1989) mentionnent que le rapport d'images peut contribuer à réduire les "bruits" provenant du changement des conditions d'observation. Toutefois, les auteurs n'expliquent pas le mécanisme de réduction des "bruits".

Les rapports sont particulièrement utiles dans la détection des changements lorsque plusieurs images de différentes dates sont utilisées dans une analyse parce qu'ils peuvent réduire les effets des facteurs environnementaux ou du système (facteurs souvent multiplicatifs) qui sont présents (Jensen, 1986). Cependant, Jensen (1986) ne présente pas d'explications au sujet de ces facteurs multiplicatifs. Ce même auteur affirme que plus ces facteurs sont contrôlés, plus la probabilité d'effectuer une détection précise des changements est accrue.

Singh (1989) mentionne que la détection des changements par rapport d'images a été critiquée par Robinson (1979) à cause de la distribution parfois non-normale (*non-Gaussian*) générée par les rapports et sur laquelle elle s'appuie. Si la distribution n'est pas normale et que l'on utilise les écarts-types pour positionner les seuils séparant les

secteurs de changements des secteurs intacts, les aires sous la courbe de chaque côté du mode (i.e. le mode étant le résultat qui apparaît le plus souvent dans une distribution) ne sont pas égales (Singh, 1989). Par conséquent, le degré d'erreur de chaque côté du mode n'est pas le même. Néanmoins, Robinson (1979) juge qu'une étude plus poussée de la méthode des rapports d'images, utilisée et testée dans différents milieux, pourrait être utile.

2.2.3. Comparaison d'indices de végétation (*vegetation index* ou *vegetation index differencing*)

Les valeurs enregistrées par les satellites Landsat peuvent être analysées de façon indépendante bande par bande ou par une combinaison de deux bandes ou plus. Une des techniques de combinaison de bandes la plus couramment utilisée pour l'étude de la végétation est le rapport de bandes (Singh, 1989).

Le rapport de deux bandes spectrales annule les effets des facteurs multiplicatifs externes sur les données enregistrées par le capteur. Ces facteurs externes affectent, au même degré, chacune des bandes (Lillesand et Kiefer, 1979). La forme générale du rapport de bande est:

$$R_{ij} = x_i / x_j$$

où R_{ij} est le rapport des valeurs des pixels correspondants x_i et x_j des bandes i et j respectivement (Singh, 1989).

Pour l'étude de la végétation, les rapports de bandes, communément appelés indices de végétation, ont été développés dans le but de rehausser les différences spectrales en se basant sur le fait que la végétation vivante absorbe le rayonnement rouge et réfléchit le proche-infrarouge. Par exemple, les chercheurs ont démontré que le rapport des bandes proche-infrarouge (PIR) et rouge (R) du capteur MSS de Landsat a une corrélation significative avec la biomasse foliaire (*green leaf biomass*) (Tucker, 1979). Il existe plusieurs indices de végétation. Il y a, entre autres:

$$\begin{aligned}
 1) \text{ Ratio vegetation index} &= \frac{\text{bande PIR}}{\text{bande R}} \\
 2) \text{ Normalized vegetation index} &= \frac{\text{bande PIR} - \text{bande R}}{\text{bande PIR} + \text{bande R}} \\
 3) \text{ Transformed vegetation index} &= \left[\left(\frac{\text{bande PIR} - \text{bande R}}{\text{bande PIR} + \text{bande R}} \right) + 0,5 \right]^{1/2}
 \end{aligned}$$

Toutefois, il existe de nombreux autres indices de végétation impliquant des transformations linéaires de différentes bandes MSS et des coefficients. Souvent, ils ont été développés dans le but d'applications spécifiques (Singh, 1989). Ils peuvent servir à détecter la vigueur de la végétation ou le contraste entre la végétation et le sol à l'arrière-plan. Un indice de végétation multitemporel peut être utilisé pour détecter la croissance des cultures. Il suffit de soustraire des indices de végétation datant, par exemple, de deux années différentes (Fung et Zhang, 1989).

Nelson (1982) affirme que la différence (ou écarts) d'indices de végétation [par exemple, $(\text{bande PIR}/\text{bande R})(t_1) - (\text{bande PIR}/\text{bande R})(t_2)$] devrait permettre de déterminer si le couvert végétal a changé de façon significative. Nelson (1982 et 1983) a utilisé trois techniques de détection des changements pour l'étude de la défoliation des arbres attribuable aux insectes. Ces trois techniques étaient : la différence d'images, le rapport d'images et la différence d'indices de végétation. Les changements que le couvert végétal subissait se sont avérés être délimités avec plus de précision par la dernière de ces trois techniques. Banner et Lynham (1981) ont utilisé une technique d'analyse multitemporelle des écarts des indices de végétation pour la cartographie des déboisements à l'aide de données provenant de la bande 5 de deux images provenant du capteur MSS de Landsat, acquises à deux années d'intervalle. D'après les résultats obtenus, cette technique ne permet pas d'établir avec précision les frontières des zones de déboisement. Elle indique plutôt la présence d'herbe ou d'une autre forme de végétation dans les zones déboisées. Elle ne fait pas ressortir les coupes à blanc en voie de régénération. Par conséquent, il est difficile de tirer une conclusion formelle quant à l'efficacité de cette technique.

2.2.4. Comparaison de classification (*classification comparison*)

Certaines techniques de détection des changements s'appuient sur les classifications produites séparément à partir d'images acquises à deux dates différentes ou sur les deux images combinées (regroupées). Une classification précise d'une seule image MSS ou TM de Landsat étant difficile, particulièrement en ce qui a trait à l'utilisation du sol en milieu urbain, les techniques de comparaison de classification doivent être utilisées avec circonspection. Les deux principales techniques de comparaison de classification semblent être la comparaison post-classification (*post-classification comparison*) et la classification des changements spectraux/temporels (*spectral/temporal change classification*) (Jensen, 1986). Cette dernière technique peut également porter le nom de classification multodate directe (*direct multirate classification*) (Singh, 1989).

La comparaison post-classification identifie les changements en comparant les classifications finales (*classification maps*) produites de façon indépendante sur chacune des images. Un algorithme compare simplement les classifications finales en utilisant, sur chacune des images, une classe spécifiée par l'analyste. Cette opération produit une image indiquant les zones de changements, mais non leur nature. En interprétant correctement la classification des deux images (t_1 et t_2), acquises à des dates différentes, l'analyste peut produire des cartes de changements (*change maps*) montrant une matrice de changements. Ainsi, il est possible d'identifier non seulement les pixels qui ont changé mais également la nature des changements (Howarth et Wickware, 1981).

Selon Singh (1989), la comparaison post-classification est prometteuse car les données des deux dates sont classifiées séparément. On minimise ainsi les problèmes reliés à la normalisation des variations atmosphériques et celles du capteur entre les deux moments d'acquisition des images. Ces variations obligent l'analyste, pour la plupart des autres méthodes, à effectuer une normalisation des données. De

plus, selon ce même auteur, cette méthode supprime le problème relié à la superposition précise d'images multidates.

Stow *et al.* (1980) affirment toutefois que, lors de l'utilisation de la méthode de comparaison post-classification, la précision de la détection des changements à partir de deux images classifiées séparément est approximativement égale au produit de la précision des classifications individuelles. Par exemple, une précision de classification de 80 % pour chacune des deux images résultera en une précision de détection des changements de 64 % ($0,8 \times 0,8$). Une classification très précise des deux images est donc essentielle afin d'obtenir une précision de détection des changements relativement élevée.

D'après Campbell (1987), la comparaison post-classification sera performante si la précision de la classification des deux images est élevée. Ainsi, les différences entre les deux images représenteront les véritables changements d'utilisation du sol et non les différences de précision de la classification. Pour cet auteur, le fort pourcentage de pixels mélangés (*mixed pixels*), lors des applications en milieu urbain et péri-urbain (pour les images MSS de Landsat), tend à diminuer la précision de la classification et, par conséquent, génère une surestimation du nombre de pixels ayant subi un changement.

La seconde technique de comparaison de classification, la classification des changements spectraux/temporels, détecte les changements à partir d'une simple classification d'un ensemble de données multidates (Jensen, 1986). Dans le cas de données MSS de Landsat, les quatre bandes de chacune des images (soit un total de huit bandes) sont analysées simultanément par des techniques de reconnaissance des arrangements ou formes (*pattern recognition techniques*). On peut établir les classes par voie dirigée ou non-dirigée. Dans le premier cas, l'analyste doit sélectionner des zones d'entraînement qui servent à établir les signatures des différentes classes. Dans le second cas, il doit classifier les objets en s'appuyant sur

leurs propriétés statistiques. Pour chacun des cas, les "classes de changements" (*change classes*) doivent posséder des statistiques fort différentes des "classes intactes" (*nonchange classes*) (Jensen, 1986). Selon Weismiller *et al.* (1977), pour que cette condition soit satisfaite (i.e. statistiques différentes), les images doivent avoir été acquises sous des conditions météorologiques similaires à la même période dans leur année respective.

Même si la classification des changements spectraux/temporels semble intéressante parce qu'elle ne nécessite qu'une seule classification, cette technique est cependant très complexe. Si huit bandes sont utilisées (i.e. 2 x 4 bandes MSS), certaines informations seront redondantes d'une bande à l'autre. Ce problème de redondance peut être surmonté par une transformation en composantes principales sur les données originales (Singh, 1989). Les composantes contenant le maximum de variance pour les deux dates pourront être utilisées lors du processus d'analyse de la classification (Singh, 1989). (L'analyse en composantes principales sera abordée plus profondément à la section 2.2.5.). En plus de la redondance, le classement des différentes nuées (i.e. les différentes classes spectrales) est souvent ardu lors de leur regroupement (*clustering*).

Weismiller *et al.* (1977) ont utilisé la classification des changements spectraux/temporels lors d'une étude en milieu côtier. Cinquante-deux classes spectrales établies au début du processus de classification furent synthétisées en cinq classes d'information (e.g. de végétation à sol nu, de sol nu à végétation, sol nu n'ayant subi aucun changement, etc.). De ces cinq classes, quatre d'entre elles représentaient des "classes de changements". Toutefois, le résultat final a été jugé peu satisfaisant par rapport aux données de référence (Weismiller *et al.*, 1977). Les résultats de la comparaison post-classification étaient utilisés comme référence.

Selon Campbell (1987), la classification des changements spectraux/temporels identifie non seulement les différentes classes d'utilisation du sol, mais également les

classes composées de pixels ayant subi des changements d'une date à l'autre. Néanmoins, il juge cette technique inefficace et imprécise à cause de la grande quantité de données impliquées et des manipulations devenant difficiles.

2.2.5. Analyse en composantes principales (Transformée de Hotelling ou *principal components analysis*)

L'analyse en composantes principales est utilisée afin de réduire le nombre de composantes spectrales à un nombre d'axes (ou composantes principales) représentant le maximum de variance dans les images multibandes initiales (Singh, 1989). Cette méthode effectue une transformation linéaire dans laquelle les axes des variables initiales subissent, géométriquement, une translation et une rotation (Beaubien, 1986). Par cette rotation des axes, la transformée de Hotelling vise à réduire au minimum la corrélation entre les canaux de sortie (Bonn et Rochon, 1992). La première composante principale contient le maximum de variance des données d'entrée. La deuxième composante principale est celle dont la variance est la plus grande après la précédente, et ainsi de suite pour l'ensemble des composantes (Bonn et Rochon, 1992).

Dans une étude multitemporelle, les changements entre composantes particulières peuvent être identifiés par une simple soustraction des valeurs (*scores*) de chacune des composantes principales respectives considérées (Lodwick, 1979). Byrne *et al.* (1980), lors de l'étude d'un milieu côtier, ont utilisé deux ensembles de quatre bandes Landsat (MSS), acquises à deux dates différentes. Celles-ci ont été superposées et traitées comme un ensemble de huit bandes pour l'analyse en composantes principales. Les résultats furent les suivants: la composante 1 représentait principalement la couverture terrestre (*land cover*) n'ayant subi aucun changement entre les deux dates, tel que mesuré par les bandes infrarouges. Cette composante était également une bonne indicatrice de la topographie et de la rugosité du terrain. La composante 2 montrait la couverture terrestre inchangée, pour la région visible du spectre. Les composantes 3 à 5 contenaient les informations relatives aux

changements. Quant aux composantes 6 à 8, elles contenaient du "bruit". Les auteurs concluent que l'analyse en composantes principales est une méthode efficace d'identification des secteurs où des changements se sont produits, pour deux ensembles de quatre bandes provenant d'images MSS de Landsat.

L'analyse en composantes principales peut être utilisée pour le rehaussement d'images en vue d'une photo-interprétation (ou interprétation analogique). D'après Bonn et Rochon (1992), l'une des plus importantes applications de la transformée de Hotelling est son utilisation pour déterminer l'état de la végétation, ou des cultures, sur des images diachroniques. Cette transformation est abordée par Fung et LeDrew (1987) sur des données MSS: la transformation *tasseled cap*. Celle-ci transpose les données dans un espace quadri-dimensionnel. Les noms des quatre axes sont: *brightness*, *greenness*, *yellowness* et *non-such* (Fung et LeDrew, 1987). Elles indiquent respectivement les caractéristiques de brillance, de biomasse verte et de jaunissement de la végétation, dans les bandes du visible. L'axe *non-such* contient des artefacts mathématiques (Lodwick, 1979). Pour les données TM, les trois axes (vecteurs) générés par la transformation *tasseled cap* sont *brightness*, *greenness* et *wetness* (Crist et Cicone, 1984).

Fung et LeDrew (1987) affirment que le concept *tasseled cap* peut être appliqué non seulement sur des données multitemporelles mais également pour la détection des changements à partir d'images de résolutions différentes. Malheureusement, ils n'approfondissent pas cette affirmation.

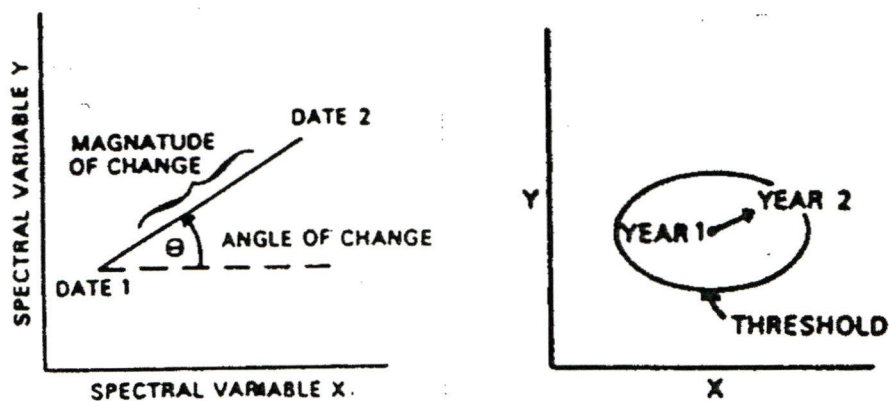
Ingebritsen et Lyon (1985) affirment que l'analyse en composantes principales d'une combinaison de deux images MSS, fournit l'information relative à la répartition, à l'importance et à la nature des changements temporels en générant des composantes principales qui représentent les changements de luminance (*brightness*) et de verdure (*greenness*). Selon eux, l'image montrant la composante "variation de luminance"

(Δ *brightness*) peut être perçue de façon analogue à une image exprimant des différences d'albédo. Quant à l'image montrant la composante "variation de verdure" (Δ *greenness*), elle communique l'information touchant les changements du couvert végétal.

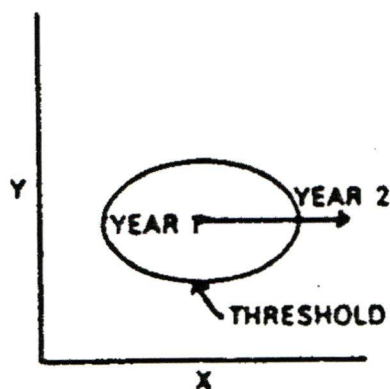
2.2.6. Analyse par changement du vecteur spectral (*change vector analysis*)

Lorsque le couvert végétal change ou est perturbé, son apparence spectrale est généralement affectée. Si deux variables spectrales sont mesurées, dans un secteur donné, avant et après que les changements aient eu lieu, et qu'elles sont représentées sur un même graphique, on devrait obtenir un diagramme semblable à celui de la figure 1-A. Les deux variables spectrales peuvent être, par exemple, des données de deux bandes ou des composantes concernant la végétation. Le vecteur décrivant la direction et l'importance (*magnitude*) du changement de la première à la seconde date est le vecteur de changement spectral (*spectral change vector*). Si l'importance du changement que subit le vecteur spectral dépasse le seuil préétabli par l'analyste, on considère alors qu'il y a eu un ou des changements dans le secteur donné. La figure 1-B illustre un cas où peu (ou pas) de changements ont été détectés. Les figures 1-C et 1-D illustrent la seconde partie d'information contenue dans le vecteur, c'est-à-dire sa direction. Cette dernière comprend l'information relative au type de changement. Par exemple, la direction du vecteur attribuable au défrichement devrait être différente de celui attribuable à la croissance de la végétation (Jensen, 1986; Singh, 1989).

1-A) changement du vecteur spectral 1-B) peu (ou pas) de changements



1-C) changement attribuable au défrichement



1-D) changement attribuable à la croissance de la végétation

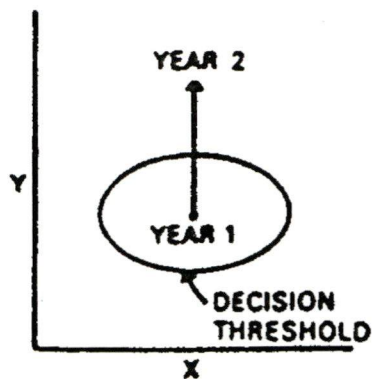


Figure 1 - Analyse par changement du vecteur spectral (tiré de Jensen, 1986).

Cette méthode a donné des résultats satisfaisants pour la détection des changements en milieu forestier (Malila, 1980, dans Singh, 1989).

2.3. Conclusion

La détection des changements à l'aide de données numériques est une opération exigeante que l'on doit effectuer de façon rigoureuse. Selon Jensen (1986), les résultats obtenus à partir des divers algorithmes ne seront probablement jamais aussi précis que ceux produits par un photo-interprète analysant des photographies

aériennes à grande échelle, prises à des dates différentes, et transférant les informations extraites sur une carte de base. Toutefois, la détection des changements de façon manuelle étant une tâche particulièrement longue, pas toujours homogène (s'il y a, par exemple, plus d'un photo-interprète), et impliquant des coûts d'acquisition des données souvent importants, il semble pertinent de chercher à améliorer les algorithmes numériques actuels de détection des changements, ou d'en développer de nouveaux.

La détection informatisée des changements est soumise à des contraintes spatiales, spectrales et temporelles. On peut choisir parmi un large éventail d'algorithmes. Les techniques de différence et de rapport d'images peuvent sembler pratiques mais certains auteurs (Weismiller *et al.*, 1977; Jensen, 1986) jugent qu'elles sont peut-être trop simples pour identifier les nombreux changements sur des images complexes. Quant à la technique de comparaison de classification, elle semble efficace seulement si l'on peut effectuer une classification de l'utilisation du sol ayant un taux élevé de précision. En ce qui a trait à l'analyse en composantes principales, elle semble être une technique de prétraitement très utile, car elle permet de synthétiser l'information comprise sur plusieurs bandes en un moins grand nombre de bandes, sans engendrer une forte perte d'information. L'analyse par changement du vecteur spectral semble être une technique peu utilisée. Par conséquent, il est difficile de formuler une conclusion cohérente quant à sa validité.

L'analyste qui utilise une technique de détection des changements doit bien connaître le secteur d'étude, la qualité des données informatiques qu'il possède, et les caractéristiques (i.e. les forces et faiblesses) des différents algorithmes qu'il peut utiliser. Selon Jensen (1986), il reste une somme considérable de travail à accomplir en ce qui a trait à l'identification de l'algorithme optimal de détection des changements pour des milieux spécifiques et des problèmes particuliers.

Les variations de valeur de radiance entre deux dates d'acquisition d'images indiquent habituellement des changements des propriétés de l'élément au sol. Il faut toutefois noter que ces changements peuvent aussi provenir de diverses sources: différences d'illumination, variations des conditions atmosphériques, variations de l'humidité du sol, etc.. Par conséquent, les variations de radiance attribuables à de véritables changements des propriétés de l'élément au sol considéré doivent être grandes par rapport aux autres facteurs pouvant affecter le capteur.

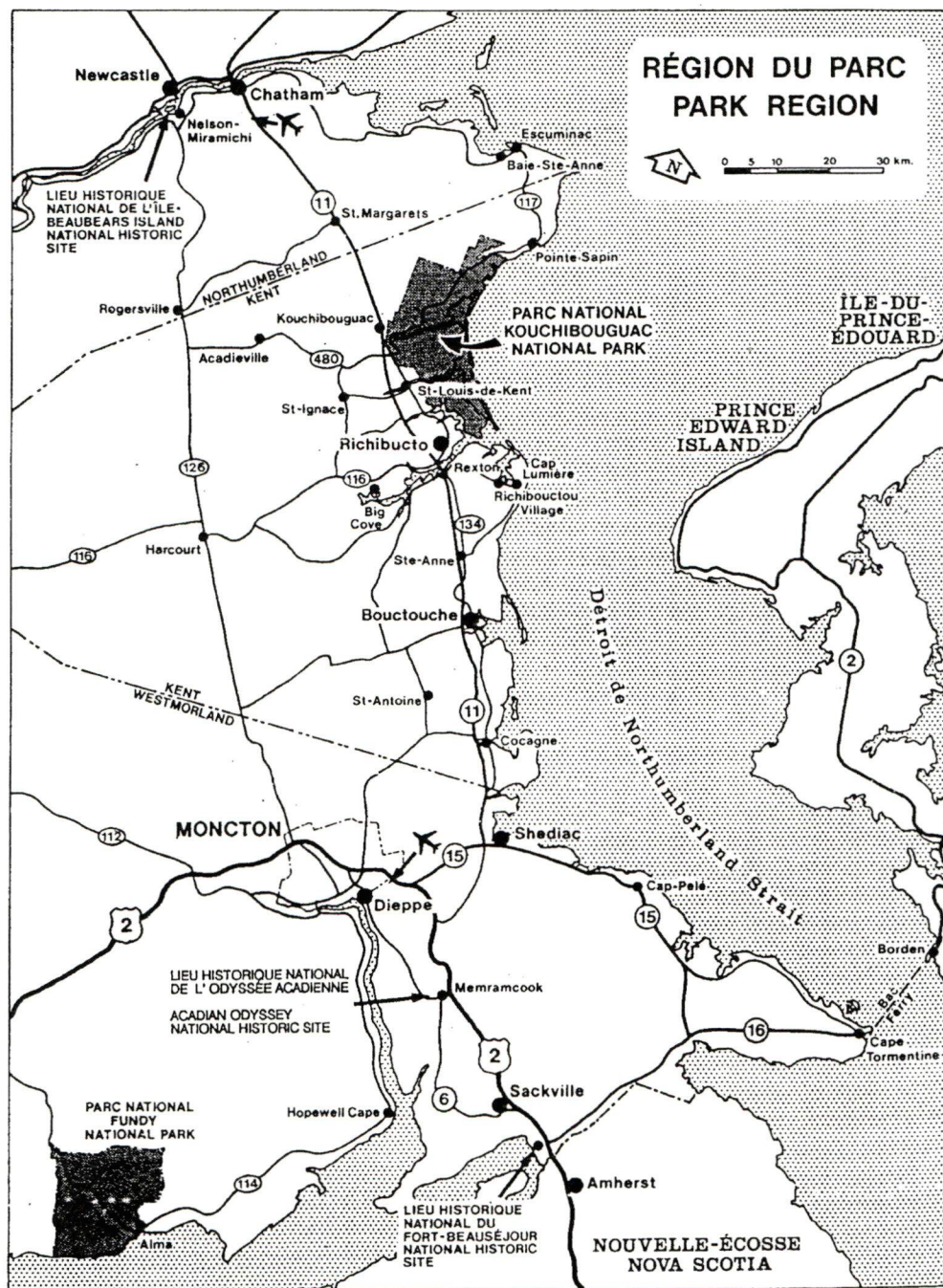
Plusieurs algorithmes de détection des changements s'appuient sur une superposition précise des images. Une superposition imprécise favorise la formation de faux secteurs de changements. La superposition des images est parfois difficile à cause de la quantité insuffisante de points d'appui. Selon Singh (1989), il serait intéressant de développer de nouveaux algorithmes ne nécessitant pas une superposition précise des images, ou ne nécessitant aucune superposition de celles-ci. Les performances des divers algorithmes dans différents environnements devront être évaluées qualitativement et quantitativement.

Dans le cadre de cette étude, nous prévoyions initialement utiliser l'analyse en composantes principales sur les images TM et MSS afin de réduire le nombre de composantes spectrales à un nombre d'axes représentant le maximum de variance dans les images multibandes initiales. Une fois les images correctement classifiées, nous pensions utiliser l'algorithme de différence d'images (voir 2.2.1) pour visualiser les changements. Toutefois, diverses constatations nous ont amené à reconsidérer les divers traitements prévus ou les algorithmes à utiliser. En effet, pour l'analyse en composantes principales, les bandes non-sélectionnées apportaient peu d'informations supplémentaires. Quant à l'algorithme de différence d'images, les pourcentages de pixels correctement classifiés pour certaines classes des deux images (TM et MSS) nous ont amené à réexaminer la pertinence de son utilisation. Les chapitres 4 (méthodologie) et 5 (analyse des résultats) présentent de façon plus

détaillée les différents traitements effectués sur les images-satellite et les faits qui nous ont conduit à revoir les traitements prévus au départ.

3. Site d'étude

La zone d'étude se situe sur la côte est du Nouveau-Brunswick et chevauche les comtés de Kent et de Northumberland (figure 2). Elle comprend le Parc national Kouchibouguac (PNK), les bassins versants qui l'entourent et une partie de la zone d'influence écologique du Parc (figure 3). Le PNK est d'une superficie de 239 km² et s'étend entre les latitudes nord 46° 42' et 46° 57' et les longitudes ouest 64° 47' et 65° 02'. La partie de la ZIC couverte par cette étude est d'environ 2 700 km² et s'étend entre les latitudes nord 46° 15' et 47° 00' et les longitudes ouest 64° 35' et 65° 35'.



Tiré de: Environnement Canada, 1993.

Figure 2 - Localisation du parc national Kouchibouguac.

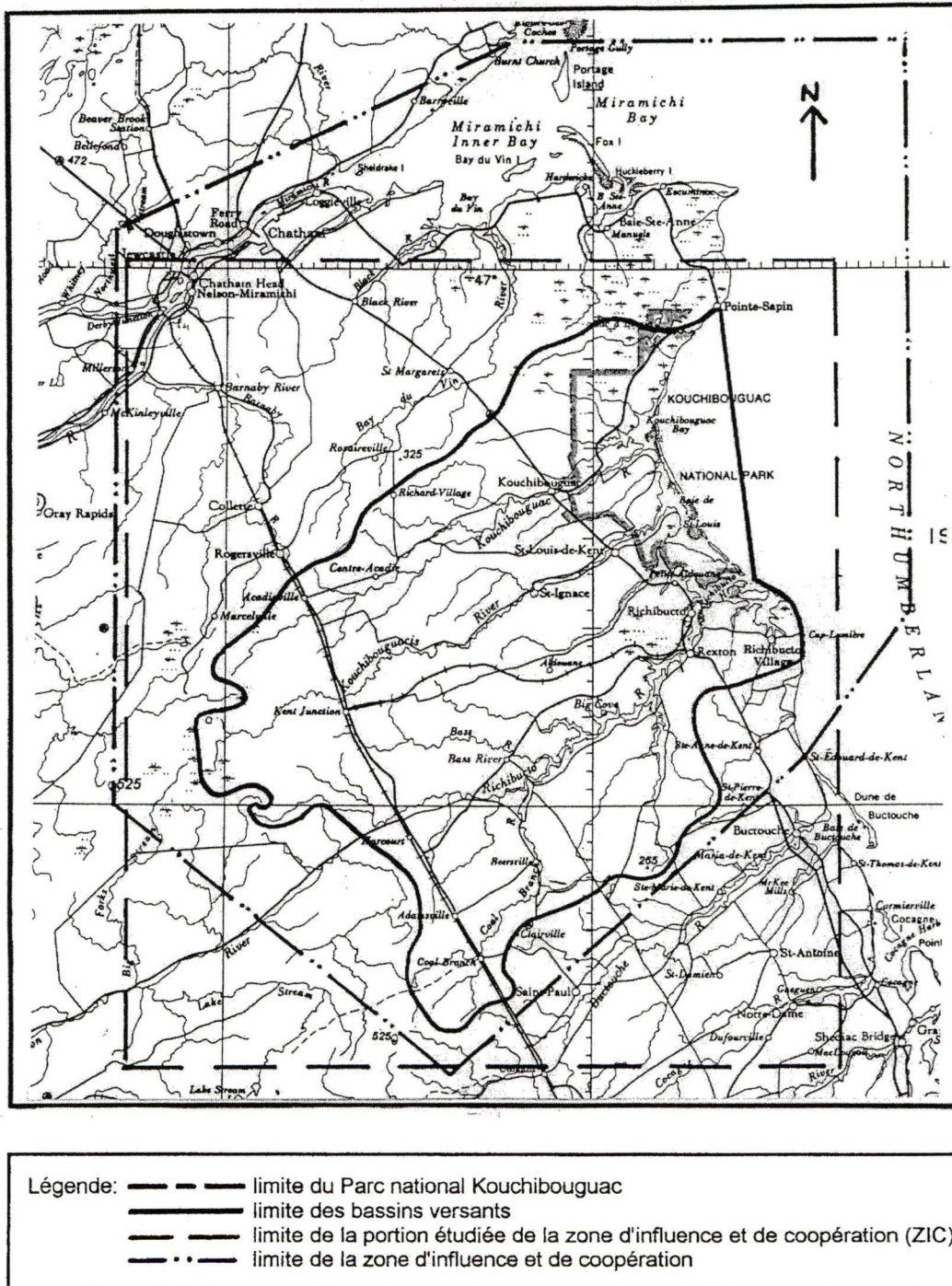


Figure 3 - Limites du Parc national Kouchibouguac, des bassins versants et de la portion étudiée de la zone d'influence et de coopération (ZIC).

Le PNK se situe dans la région naturelle de la plaine des Maritimes, dans la région géographique des Appalaches. Il est considéré comme faisant partie de la zone du golfe du Saint-Laurent de la région côtière de l'Atlantique (Desloges, 1979). Les principaux traits de ce territoire sont un système de cordons littoraux, de lagunes et d'estuaires dans la partie littorale. On dénote également la présence de tourbières et de forêts mixtes dans la partie terrestre. On y trouve aussi d'anciennes friches, vestiges des terres cultivées avant la mise en place du Parc. Ce dernier se situe sur une plaine côtière uniforme qui s'incline doucement vers le détroit de Northumberland à raison de moins de cinq (5) mètres par kilomètre. Le point le plus élevé du Parc dépasse à peine trente (30) mètres d'altitude mais plus des trois quarts du Parc ne dépasse pas quinze (15) mètres d'altitude (Desloges, 1979).

La limite des bassins versants (figure 3) englobe les systèmes de drainage majeurs ayant leur exutoire dans le PNK. Ce sont les bassins versants des rivières Kouchibouguac, Saint-Louis, Black, au Portage et Fontaine et des ruisseaux Major, Rankin et Pollys (Desloges, 1979).

Pour des raisons cartographiques (clarté et visibilité des images et des cartes résultantes) et de disponibilité de photographies aériennes (quantité de photos et coût), on ne considère qu'une partie de la ZIC et non sa superficie totale, qui couvre environ

6 500 km². Toutefois, ces limites débordent suffisamment du site du Parc pour servir les objectifs de cette étude.

La partie de la ZIC à l'étude est majoritairement couverte de forêts mixtes et résineuses, ces dernières entourant les nombreuses et vastes tourbières. Les forêts de feuillus sont présentes mais peu abondantes. Les zones de coupes forestières récentes et de régénération après coupes sont fréquentes. Le milieu agricole est présent sur le territoire mais surtout regroupé en bordure des rivières Saint-Louis, Richibucto et Bouctouche. Le milieu urbanisé se compose de petits villages. Les

agglomérations de taille significative se situent, pour la plupart, le long du littoral ou en bordure des estuaires. Le relief est légèrement ondulé, voire plat. L'altitude maximale atteinte, dans la partie étudiée de la ZIC, est de 100 mètres, mais varie surtout entre 40 et 60 m.

4. Méthodologie

La méthodologie utilisée pour atteindre les objectifs mentionnés précédemment se divise en quatre (4) grandes étapes :

- 1) le traitement numérique des deux (2) images-satellite (TM de 1993 et MSS de 1977) classifiées par maximum de vraisemblance;
- 2) la photo-interprétation et les levés de terrain;
- 3) l'intégration dans le SIG des résultats obtenus à partir des deux (2) images-satellite, de la photo-interprétation et des levés de terrain,
- 4) l'analyse et l'interprétation des résultats.

La figure 4 présente l'organigramme méthodologique du projet.

4.1. Traitement numérique des deux (2) images-satellite

Dans le cadre de ce projet, les images-satellite retenues datent du 10 août 1993 et du 8 juillet 1977, soit un intervalle de seize (16) années. Elles ont une résolution spatiale de 30 m pour l'image TM et de 80 m pour l'image MSS. L'image de 1993 a été retenue car elle fait partie de la base de données du PNK et est de bonne qualité (faible pourcentage de nuage). Quant à l'image du 8 juillet 1977, elle a été retenue (parmi un choix de quatorze images allant de 1972 à 1983) en vertu des critères suivants: période de l'année par rapport à l'image de 1993 et faible couverture nuageuse (2 %). La décision d'utiliser une image provenant du capteur MSS des satellites Landsat-1, 2 ou 3 datant des années 1972 à 1983 a été dictée par le fait que ce sont les seules données numériques qui nous permettent d'observer l'état de la ZIC quelques années après la création du PNK. La résolution spatiale (des pixels) de cette

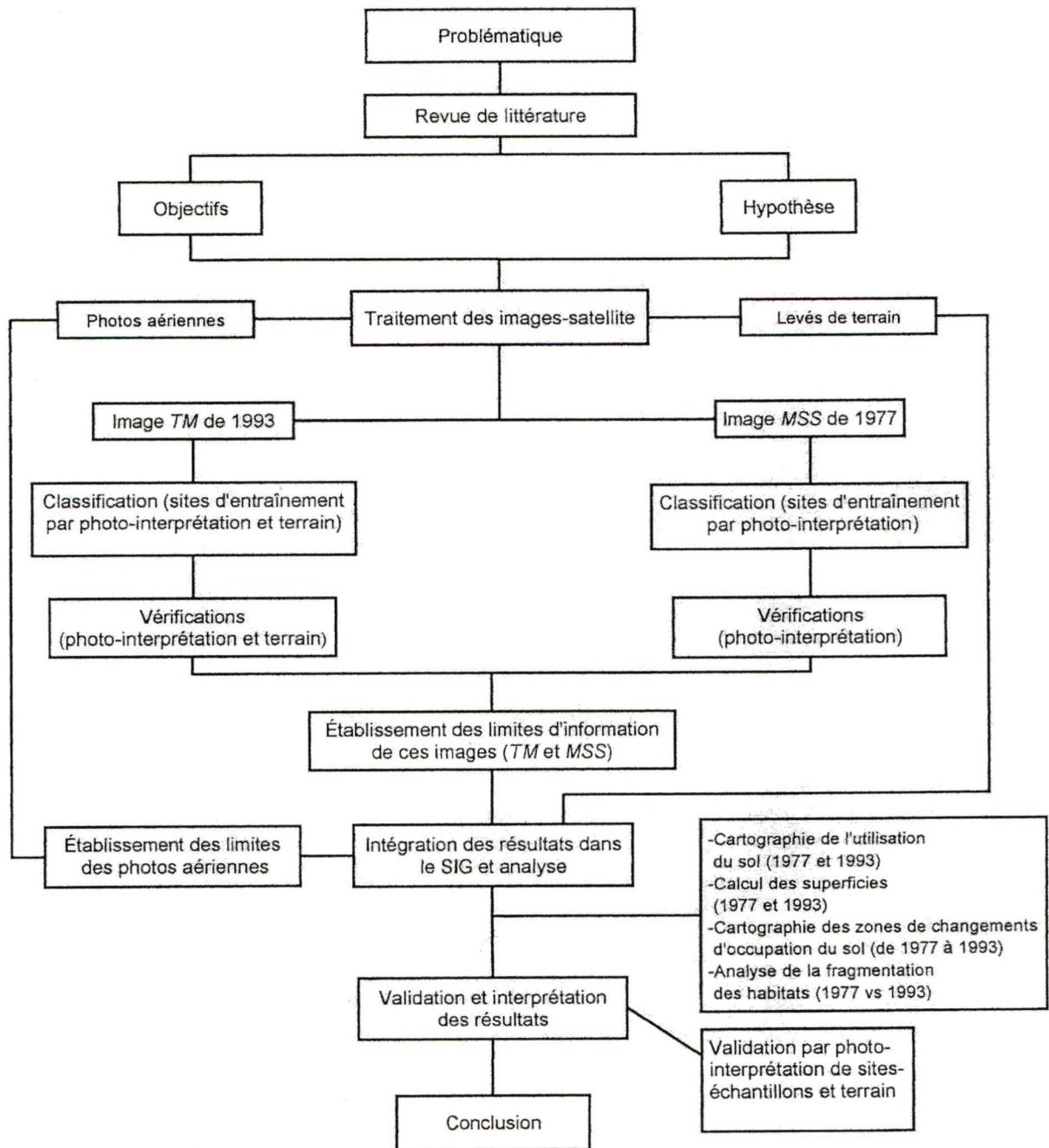


Figure 4 - Organigramme méthodologique.

image est relativement faible par rapport aux standards actuels, mais c'est ce qu'il y avait de mieux en matière de capteur spatial multibande à l'époque. On base également cette décision sur Ryerson (1980) qui affirme qu'on peut déterminer l'utilisation très générale du sol (*very general land use*) à l'aide d'images provenant du capteur MSS. Afin de minimiser les effets dus à l'angle solaire ou au stade de développement de la végétation, on a utilisé des images ayant été prises à des périodes analogues dans leurs années respectives et à des heures similaires afin de minimiser l'effet d'ombre différentiel.

Les bandes utilisées dans chacune des images sont celles qui contiennent le maximum d'information sur le milieu à forte végétation qu'est la ZIC. On avait un choix de sept (7) bandes spectrales pour l'image de 1993 et un choix de quatre (4) bandes spectrales pour l'image de 1977. En s'appuyant sur des études effectuées par Lafrance (1987) et Beaubien (1987) dans un milieu similaire à celui étudié ici, et par une analyse visuelle des bandes disponibles, les bandes 3, 4 et 5 du capteur TM de Landsat ont été sélectionnées. Pour le capteur MSS de Landsat, les bandes 4, 5 et 7 ont été retenues en se basant sur une analyse visuelle de l'information facilement discernable sur celles-ci, et sur le fait que les longueurs d'ondes couvertes par ces bandes se rapprochent de celles choisies pour l'image TM de Landsat.

Cette étape consiste à effectuer divers traitements sur les deux (2) images-satellite en vue de faire la classification de l'information qu'elles contiennent. Il s'agit, plus précisément, d'effectuer les corrections radiométriques et géométriques puis la classification des images avec le logiciel de traitement d'images *EASI/PACE*. La classification des deux images a été faite au moyen de l'algorithme de maximum de vraisemblance (classification dirigée). Une évaluation des classes pour chacune des images a été effectuée à l'aide du logiciel de traitement d'images [modules *SIGSEP* (*classifier signature separability*) et *MLR* (*maximum likelihood report*)].

À partir du choix de bandes effectué pour chacune des images-satellite, les corrections radiométriques apportaient peu d'informations supplémentaires et s'avéraient pratiquement inutiles. En géoréférençant les images à l'aide du logiciel de traitement d'images et en superposant le réseau routier vectoriel de la région (en format numérique et provenant d'une source indépendante), les distorsions géométriques sont apparues infimes, voire insuffisantes, pour justifier une correction géométrique (figures 5 et 6). Quant à l'analyse des composantes principales prévue initialement, elle n'a pas été effectuée puisqu'on utilisait seulement trois (3) bandes pour chacune des images et que les bandes non-sélectionnées apportaient peu d'informations supplémentaires. Aucun filtrage n'a été effectué avant la classification. Suite à la classification, on a filtré les images résultantes à l'aide d'un filtre modal 3x3 afin de diminuer la quantité de pixels non-classés mais qui se situaient dans des secteurs où leur appartenance était clairement identifiable.

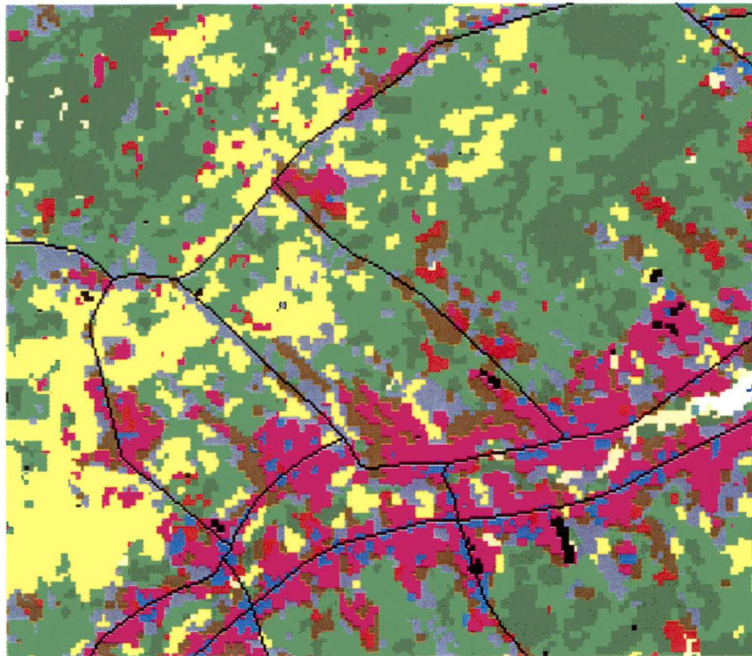


Figure 5 - Superposition du réseau routier vectoriel sur l'image MSS de Landsat (1977). Le nord correspond à la partie supérieure de la figure.

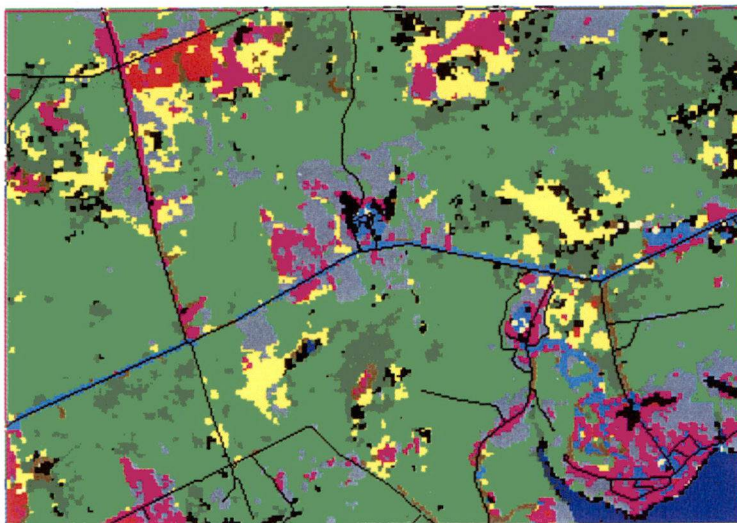


Figure 6 - Superposition du réseau routier vectoriel sur l'image TM de Landsat (1993).
Le nord correspond à la partie supérieure de la figure.

En vue de la détection des changements d'utilisation du sol, la classification des images s'est faite selon deux (2) procédés légèrement différents. Pour l'image de 1977, les sites d'entraînement ainsi que la vérification de la classification ont été établis par photo-interprétation. Pour l'image de 1993, les sites d'entraînement ont été établis par photo-interprétation et par des visites sur le terrain. La vérification de la classification s'est faite sur le terrain et par photo-interprétation. Le résultat final de la classification est présenté sous la forme de deux compositions colorées.

Les traitements effectués à l'aide du logiciel de traitement d'images ont permis de déterminer les limites (i.e. le degré d'apport) des images MSS et TM pour la détection et les changements d'utilisation du sol, et pour quels types d'utilisation du sol la télédétection satellitaire est performante et où elle ne l'est pas. On a ainsi pu déterminer où les photographies aériennes s'avèrent indispensables à l'interprétation. L'échelle approximative des photographies aériennes couvrant le secteur étudié varie de 1/10 000 à 1/50 000. Par la même occasion, cette étape visait à déterminer

l'échelle appropriée de ces dernières selon le niveau d'information que l'on veut obtenir.

4.2. Photo-interprétation et levés de terrain

Pour l'image MSS (1977), les photographies aériennes à l'échelle 1:10 000 (de 1973 et 1974) furent les principales sources des données permettant d'établir des sites d'entraînement pour la classification. Les photographies aériennes utilisées couvraient principalement les secteurs de Rivière-au-Portage, Laketon, Saint-Charles et Saint-Ignace Siding. Afin de vérifier la classification obtenue avec le logiciel de traitement d'images numériques, nous avons utilisé d'autres photographies aériennes provenant de la même série que celles utilisées pour les sites d'entraînement.

Pour l'image TM (1993), les photographies aériennes à l'échelle 1:10 000 (de 1991 et 1995) furent une des sources de données permettant d'établir des sites d'entraînement. Ces photographies aériennes couvraient surtout le PNK et s'étendaient quelque peu au-delà de la limite du PNK. Des levés de terrain effectués en août 1997 ont permis de noter et photographier les multiples utilisations du sol à l'intérieur du PNK et dans la ZIC. Ces levés furent aussi utilisés comme source d'information pour les sites d'entraînement. Pour valider la classification, nous avons utilisé des photographies aériennes provenant de la même série que celles utilisées comme sites d'entraînement ainsi que d'autres observations notées lors des levés de terrain.

La classification des deux images-satellite nous a permis d'établir les limites de l'information que l'on peut tirer de celles-ci et où les photographies aériennes deviennent indispensables pour une meilleure identification des types d'utilisation du sol.

4.3. Intégration dans le SIG

Les deux images classifiées et filtrées ont ensuite été importées dans les SIG ArcView GIS (version 3.1) et ArcInfo 8.

Le SIG ArcView a permis de cartographier l'utilisation du sol et de calculer la superficie des diverses classes d'utilisation du sol pour 1977 et 1993. Les tableaux 4 et 5 présentent les superficies des classes d'utilisation du sol en fonction des différents niveaux d'analyse (bassin versant, PNK).

Le SIG ArcInfo 8 a permis de produire une carte des zones de changements à partir des images MSS et TM classifiées. Nous avons utilisé ce SIG car il permettait des manipulations plus poussées que le logiciel de traitement d'images (PCI) utilisé pour la classification. L'algorithme de détection des changements employé par le SIG, la comparaison post-classification, correspond presque à celui décrit au chapitre 2 (section 2.2.4). Toutefois, en plus d'indiquer les zones de changements, la commande *Combine* du SIG a permis d'identifier la nature des changements.

4.4. Analyse et interprétation des résultats

Afin de valider les résultats obtenus avec les images de 1977 et 1993 traitées parallèlement, nous avons effectué, pour chacune des classes finales obtenues sur ces images, une analyse par photo-interprétation. Les photos aériennes disponibles et les secteurs que les gestionnaires du PNK jugeaient les plus pertinents ont aussi dictés nos choix de secteurs. Pour chacune des classes, le lecteur pourra, au chapitre 5, comparer une photographie aérienne aux images MSS et TM classifiées.

De plus, cette étape consistait à interpréter les changements d'utilisation du sol survenus dans le PNK et la ZIC sur une période de 16 ans.

5. Analyse des résultats

Afin de comparer les deux images, on devait établir un même nombre de classes pour chacune. À cause des signatures spectrales similaires de diverses utilisations du sol présentes sur l'image MSS, il s'est avéré impossible de créer les différentes classes que l'on souhaitait initialement. Elles ont donc été regroupées selon leur signature spectrale et leur apparence physique sur le terrain. Les cartes de l'annexe 2 montrent la classification finale des deux images pour le PNK, les bassins versants et la portion étudiée de chacune des images-satellite. L'annexe 3 comprend deux cartes grand format montrant la classification finale des deux images-satellite. L'annexe 4 se compose, quant à elle, d'une carte montrant les zones de changements d'utilisation du sol et la nature des changements. Nous devons toutefois analyser avec réserve et discernement les résultats présentés sur cette dernière carte car certaines classes ont un faible pourcentage de pixels correctement classifiés.

Les images-satellite MSS et TM classifiées permettent de commenter sommairement la fragmentation des habitats, un peu plus loin dans ce chapitre (section 5.3). D'après Parcs Canada (2000), l'étude de la fragmentation des habitats consiste à évaluer la perte ou l'isolement des habitats naturels. Elle s'intéresse principalement aux conséquences de l'isolement des écosystèmes et plus particulièrement aux conséquences de cet isolement sur le potentiel de dispersion des organismes. La fragmentation de l'habitat sert d'indice pour mesurer la productivité de l'écosystème visé, de même que la composition des espèces et les processus qu'il intègre. L'étude de la fragmentation du paysage peut fournir des renseignements qui permettront de situer la localisation, l'étendue et le degré d'isolement des parcelles restantes du massif forestier, ainsi que d'évaluer la qualité de la végétation disponible pour la faune.

Grâce aux visites sur le terrain, nous avons pu identifier avec certitude différents types d'utilisation du sol pour l'image TM. Toutefois, comme l'image MSS possédait la plus faible résolution (80 m comparativement au 30 m de l'image TM), celle-ci a limité le

nombre de classes à treize. Les valeurs des indices de séparabilité des signatures spectrales (obtenues à l'aide du logiciel de traitement d'images) et l'apparence physique (sur le terrain) des différentes classes désirées initialement ont aussi guidé le choix des classes à retenir. Le tableau 1 présente les classes obtenues initialement pour l'image TM. Sur cette dernière, certaines classes ont été fusionnées afin d'avoir le même nombre de classes que sur l'image MSS, permettant ainsi de comparer les deux images.

Le tableau 2 décrit les classes finales des deux images-satellite suite à la classification par maximum de vraisemblance. Les statistiques sur la séparabilité des signatures spectrales, calculées à l'aide du logiciel de traitement d'images, ont permis d'établir la classification de l'image MSS et, par la suite, de l'image TM.

Tableau 1 - Description des classes obtenues initialement sur l'image TM de Landsat.

Classes	Description
Forêt résineuse	milieu couvert principalement de conifères adultes (plus de 75 %)
Forêt feuillue	milieu couvert principalement de feuillus adultes (plus de 75 %)
Forêt mixte	milieu couvert de conifères et feuillus adultes (entre 50 et 75 %)
Coupe forestière	coupe totale récente
Régénération forestière	couvert végétal après coupe (plus de 3 ans)
Champ cultivé	couvert végétal récoltable pour des fins agricoles
Champ en friche	champ non-récolté depuis plusieurs années ou abandonné
Sol nu	surface où il y a absence de végétation
Tourbière	terre ou milieu humide composé de tourbe (tourbière non-exploitée)
Marais salé	nappe d'eau stagnante généralement peu profonde recouvrant un terrain partiellement envahi par la végétation
Marécage	Terrain humide et bourbeux
Dune et plage	surface de sable à nu ou recouverte d'une végétation éparse
Eaux marines profondes	eau en milieu marin
Eaux peu profondes	milieu estuarien et fluvial
Haut-fond	lagune peu profonde
Agglomération	regroupement important d'habitations
Corridor de communication	route et chemin
Nuages	amas de vapeurs d'eau en suspension dans l'air
Pixels non-classés	pixels n'appartenant à aucune des classes ci-dessus

Tableau 2 - Description des classes finales des images TM et MSS de Landsat.

Classes	Description
Forêt résineuse	milieu couvert principalement de conifères adultes (plus de 75 %)
Forêt feuillue	milieu couvert principalement de feuillus adultes (plus de 75 %)
Forêt mixte	milieu couvert de conifères et feuillus adultes (entre 50 et 75 %)
Régénération forestière	couvert végétal après coupe (plus de 3 ans) et friches agricoles
Milieu agricole	champ cultivé et en friche récente (NOTE : à l'intérieur des limites du PNK, il n'y a plus d'agriculture. On doit donc considérer le milieu agricole comme des "champs")
Coupe forestière et sol nu	coupe totale récente et surface où il y a absence de végétation (peuvent être des tourbières exploitées)
Milieu humide	Tourbière (non-exploitée), marais salé, marécage
Dune et plage	surface de sable à nu ou recouverte d'une végétation éparse
Eau	cours d'eau et surfaces d'eau suffisamment importants pour être captés
Milieu urbanisé	corridors de communication (routes) et regroupement d'habitations (agglomérations urbaines)
Haut-fond	lagune peu profonde
Nuages	amas de vapeurs d'eau en suspension dans l'air
Non-classés	pixels n'appartenant à aucune des classes ci-dessus

Le tableau 3 montre les pourcentages de pixels correctement classifiés (PPCC) pour les images MSS (1977) et TM (1993) et la (les) classe(s) des pixels incorrectement classifiés. On observe que le PPCC est généralement plus élevé sur l'image TM que sur l'image MSS. Toutefois, pour les classes **milieu agricole**, **milieu humide** et **nuages**, le PPCC est plus élevé sur l'image MSS. Comme le choix des sites d'entraînement était généralement plus facile sur l'image TM grâce à sa meilleure résolution spatiale (30m), les faibles PPCC pour ces trois classes pourraient être

Tableau 3 - Pourcentage de pixels correctement classifiés sur les images MSS (1977) et TM (1993) de Landsat complètes¹.

No	Classes	Pixels correctement classifiés (%)		Classe des pixels incorrectement classifiés (% dans une autre classe)	
		Image MSS	Image TM	Image MSS	Image TM
1	Forêt résineuse	89,9	98,0	8 % ds cl. 3	négligeable
2	Forêt feuillue	76,5	99,5	15 % ds cl. 4	négligeable
3	Forêt mixte	73,8	93,7	11 % ds cl. 1	5 % ds cl. 4
4	Régénération forestière	68,8	79,6	16 % ds cl. 2 et 13 % ds cl. 6	13 % ds cl. 5
5	Milieu agricole	79,2	64,8	17 % ds cl. 10	18 % ds cl. 4 et 10 % ds cl. 6
6	Coupe forest. et sol nu	87,1	93,6	6 % ds cl. 10	3 % ds cl. 8
7	Milieu humide	92,1	76,6	5 % ds non-classés	15 % ds cl. 2
8	Dune et plage	70,7	81,8	15 % ds cl. 10	13 % ds cl. 6
9	Eau	99,1	99,9	négligeable	négligeable
10	Milieu urbanisé	42,4	52,0	23 % ds cl. 8 et 16 % ds cl. 5	18 % ds cl. 5
11	Haut-fond	74,4	94,6	17 % ds cl. 12	2 % ds cl. 12
12	Nuages	97,2	75,4	négligeable	14 % ds cl. 10

(Note concernant le tableau ci-dessus : le pourcentage de pixels non-classés est d'environ 4 % pour l'image TM et de moins de 1 % pour l'image MSS.)

¹ Les pourcentages de pixels correctement classifiés sont calculés pour les images rectangulaires (voir figure 3).

attribuables à une piètre sélection des pixels utilisés comme sites d'entraînement pour la classification par maximum de vraisemblance. On constate cependant, pour ces trois classes, qu'un fort pourcentage de pixels **incorrectement** classifiés se situe principalement dans une seule autre classe. Par exemple, pour le milieu agricole, 18 % de pixels incorrectement classifiés sont dans la classe **régénération forestière**. Pour le milieu humide, 15 % de pixels incorrectement classifiés sont dans la classe **forêt feuillue**. Finalement, pour la classe **nuage**, 14 % de pixels incorrectement classifiés sont dans la classe **milieu urbanisé**.

On observe que le PPCC pour le milieu urbanisé est particulièrement faible sur les deux images si l'on compare aux pourcentages de pixels correctement classifiés obtenus pour les autres classes (tableau 3). Il est de 42,4 % sur l'image MSS et 52,0 % sur l'image TM. On constate toutefois, pour l'image MSS, que les pixels **incorrectement** classifiés, pour cette classe, sont surtout regroupés dans les classes **dune/plage** (23 %) et **milieu agricole** (16 %). Sur l'image TM, 18 % de pixels **incorrectement** classifiés se retrouvent dans le milieu agricole. Les causes possibles de ces faibles pourcentages de pixels correctement classifiés seront abordées de façon détaillée plus loin dans ce chapitre.

Le SIG a permis l'analyse des superficies selon deux niveaux. Premièrement, à l'intérieur des limites du PNK et, deuxièmement, à l'intérieur de la limite des bassins versants touchant le PNK. Les tableaux 4 et 5 montrent les superficies et les variations de superficies (en pourcentage et en hectares) pour chacune des classes. Les années 1977 et 1993 correspondent respectivement aux capteurs MSS et TM de Landsat.

Tableau 4 - Superficie et pourcentage de changement pour chacune des classes d'utilisation du sol en 1977 et 1993, à l'intérieur du PNK.

Classes	Pourcentage d'occupation		Superficie (hectares)		Changement (%)	Changement (hectares)
	1977	1993	1977	1993		
Forêt résineuse	22,8	25,6	5417	6079	2,8	662
Forêt feuillue	5,8	9,8	1384	2322	4,0	939
Forêt mixte	25,1	21,3	5967	5069	-3,8	-898
Régénération forestière	12,2	3,7	2905	880	-8,5	-2025
Millieu agricole	1,8	2,1	418	498	0,3	80
Coupes forestières et sols nus	1,6	0,7	380	160	-0,9	-221
Millieu humide	11,7	15,0	2772	3563	3,3	791
Dunes et plages	3,2	2,1	751	491	-1,1	-260
Eau	8,3	10,2	1979	2437	1,9	458
Millieu urbanisé	0,7	0,4	163	98	-0,3	-65
Hauts-fonds	3,0	3,3	723	791	0,3	68
Nuages	3,7	1,7	888	401	-2,0	-487
Non-classés	0,2	4,2	48	1004	4,0	955
TOTAL	100	100	23794	23792		

En analysant les variations de superficies à l'intérieur de limites du PNK (tableau 4), on observe que :

- la **régénération forestière** détient le plus fort pourcentage de variation avec une diminution de presque 9%. Cette diminution du pourcentage de régénération forestière pourrait être attribuable au fait que les friches agricoles et les zones de régénération après coupes sont passées au stade forestier (i.e. elles sont de plus en plus boisées), car aucune culture ou coupe n'ont eu lieu dans le PNK depuis sa création. On doit toutefois considérer que le pourcentage de pixels correctement classifiés (PPCC) pour la régénération forestière est de 68,8 % pour l'image MSS et 79,6 % pour l'image TM (tableau 3).
- les classes **forêt résineuse** et **forêt feuillue** semblent compenser la diminution de régénération forestière par un accroissement de leur pourcentage d'occupation de presque 3 % et 4 % respectivement. On notera cependant que le PPCC pour la forêt résineuse est de 89,9 % sur l'image MSS et de 98,0 % sur l'image TM tandis que le PPCC pour la forêt feuillue est de 76,5 % pour MSS et de 99,5 % sur TM (tableau 3).
- la diminution du pourcentage de **forêt mixte** (-4 %) pourrait être attribuable au fait que le capteur TM discerne mieux les forêts résineuse et feuillue que le capteur MSS (si l'on suppose que le capteur TM observe moins de **forêt mixte** car il distingue mieux les forêts **résineuse** et **feuillue**). Notons que les bandes utilisées pour l'image MSS (bandes 4, 5 et 7) et TM (bandes 3, 4 et 5) ne couvrent pas exactement les mêmes régions du spectre électromagnétique et n'ont pas des étendues similaires sur celui-ci (Bonn et Rochon, 1992). Elles peuvent donc percevoir différemment le milieu forestier sur les deux images. Il faut également considérer le fait que le capteur TM possède une meilleure résolution spatiale (30m) que le capteur MSS (80 m). Notons enfin que le PPCC est de 73,8 % sur l'image MSS et de 93,7 % sur l'image TM.
- l'augmentation de 3 % du **milieu humide** pourrait également être expliquée par la meilleure performance du capteur TM (comparativement à MSS), surtout si l'on

considère que le milieu humide est relativement stable car il n'est pas exploité dans le PNK. Nous devons toutefois mentionner que le PPCC pour le milieu humide est de 92,1 % pour l'image MSS et de seulement 76,6 % pour l'image TM.

- l'augmentation du pourcentage d'**eau** (1,9 %) pourrait être attribuée au fait que la résolution de 30 m du capteur TM permet de percevoir les cours d'eau étroits que MSS ne perçoit pas. La présence de nouveaux barrages de castors peut aussi avoir provoqué l'élargissement de certains cours d'eau; la population de castors dans le secteur a, en effet, plus que doublé de 1977 à 1993 (Poulin, 2001). On remarquera que le PPCC est particulièrement élevé, soit 99,1 % pour l'image MSS et 99,9 % pour l'image TM.
- la classe **dune et plage** diminue de 1,1 %. On dénote cependant que le PPCC est de 70,7 % pour l'image MSS et de 81,8 % pour l'image TM. Pour cette classe, il est possible que la forme de la dune ait varié mais sa superficie a probablement peu changé. C'est un milieu dynamique. La hauteur de la marée sur chacune des images peut également influencer la superficie de plage exposée.
- la classe **coupe forestière et sol nu** diminue de 0,9 %. On observe toutefois que le PPCC est de 87,1 % pour l'image MSS et de 93,6 % pour l'image TM. Comme il n'y a pas de coupes forestières dans le PNK, la variation de superficie est probablement plus attribuable à l'imprécision de la classification qu'à un changement réel.
- la classe **milieu agricole** augmente de 0,3 %. Comme il n'y a pas d'exploitation agricole dans le PNK, le **milieu agricole** (anciens champs) a été graduellement envahi par la végétation. De ce fait, il aurait été cohérent d'observer une augmentation significative de la **régénération forestière** plutôt qu'une diminution (tableau 4). Il est étonnant de ne pas obtenir une diminution importante de la superficie occupée par le milieu agricole. On dénote cependant que le PPCC pour le milieu agricole est de 79,2 % pour l'image MSS et de 64,8 % pour l'image TM. Des sites d'entraînement de piètre qualité pourraient expliquer le faible PPCC pour l'image TM.

- la classe **haut-fond** augmente également de 0,3 %. On observera toutefois que le PPCC est de 74,4 % pour l'image MSS et de 94,6 % pour l'image TM. Les haut-fonds sont un milieu dynamique. Il est possible qu'ils aient changé de forme de 1977 à 1993 mais il est peu probable qu'ils aient radicalement changé en superficie. L'augmentation de superficie peut être due à une hauteur de marée légèrement différente entre les deux images. Selon Poulin (2001), la lagune se remplit lentement au cours des ans et les dunes reculent progressivement.
- la classe **milieu urbanisé** diminue de 0,3 %. Le PPCC est ici particulièrement bas pour les deux images. Il est de 42,4 % sur l'image MSS et de 52,0 % sur TM. Le choix des sites d'entraînement était, pour cette classe, particulièrement difficile. On devait sélectionner minutieusement chaque pixel car ils ressortaient peu parmi les autres pixels, particulièrement sur l'image MSS (résolution spatiale de 80 m). L'urbanisation a eu lieu à l'extérieur des limites du PNK.
- sur l'image MSS, les **nuages** occupent une superficie de 888 hectares. Sur l'image TM, ils occupent 401 hectares.
- sur l'image MSS, les pixels non-classés occupent une superficie de 48 hectares. Sur l'image TM, ils occupent 1004 hectares.

Les classes **milieu humide**, **dunes/plages** et **eau** doivent être considérées, selon nous, comme des milieux significatifs pour vérifier la justesse des résultats obtenus car ces milieux ont peu changé entre 1977 et 1993. Nous devons cependant nuancer l'affirmation précédente en spécifiant que la superficie couverte par la classe **dunes/plages** semble stable mais que le milieu demeure néanmoins dynamique. Une dune en 1977 est encore une dune en 1993 mais sa forme peut avoir changé. Si les **dunes/plages** ont changé de superficie, l'échelle à laquelle nous avons réalisé l'étude ne nous permet pas d'en déceler les changements.

Le PNK est un milieu protégé mais néanmoins en constante évolution. Lorsqu'on analyse les résultats obtenus pour l'utilisation du sol à l'intérieur des limites du PNK,

nous devons tenir compte à la fois du pourcentage de changement de superficie et du PPCC pour la classe considérée. La probabilité que les changements de superficie observés soient le reflet de la réalité s'accroît proportionnellement avec l'augmentation du PPCC. Par exemple, pour le milieu urbanisé, la diminution de superficie, de 1977 à 1993, n'est que de 0,3 % mais les PPCC pour cette classe ne sont que de 42,4 % (image MSS) et 52,0 % (image TM). Pour la forêt résineuse, on observe une augmentation de superficie de presque 3 % de 1977 à 1993 mais les PPCC sont de 89,9 % (image MSS) et 98,0 % (image TM). Il faut donc considérer les changements de superficie avec circonspection lorsque les PPCC sont bas.

Quant aux variations de superficies à **l'intérieur des limites des bassins versants** (tableau 5), on constate:

- que les variations les plus importantes se situent dans les classes **forêt feuillue** et **forêt mixte** avec, respectivement, une diminution et une augmentation de près de 5 %. Les nombreuses coupes forestières à l'extérieur et en bordure du PNK pourraient expliquer la diminution de superficie de la forêt feuillue. Pour cette dernière, on doit toutefois tenir compte du fait que le PPCC est de 76,5 % sur l'image MSS et de 99,5 % sur l'image TM. L'augmentation de la superficie couverte par la forêt mixte peut être due à une diminution de son exploitation de 1977 à 1993 ou à la diminution de la forêt résineuse et feuillue. On doit toutefois tenir compte du fait que, pour la forêt mixte, le PPCC est de 73,8 % sur l'image MSS et de 93,7 % sur l'image TM (tableau 3). Un PPCC plus élevé pour l'image MSS permettrait de mieux vérifier les hypothèses que nous proposons ici. De plus, pour la forêt feuillue sur l'image MSS, on observe que 15 % de pixels incorrectement classifiés sont regroupés dans la classe **régénération forestière**.
- une diminution de 3 % des superficies occupées par la **forêt résineuse**. Cette diminution pourrait être attribuable à l'exploitation forestière et, en partie, à la présence de la tordeuse de bourgeons (de l'épinette). La tordeuse était présente au Nouveau-Brunswick à la fin de la décennie 1970 (Varty, 1980). Les feux de forêt peuvent également avoir contribué à la variation des superficies forestières à

Tableau 5 - Superficie et pourcentage de changement pour chacune des classes d'utilisation du sol en 1977 et 1993, à l'intérieur des bassins versants communs au PNK et à la ZIC.

Classes	Pourcentage d'occupation		Superficie (hectares)		Changement (%)	Changement (hectares)
	1977	1993	1977	1993		
Forêt résineuse	19,6	16,4	51373	43043	-3,2	-8329
Forêt feuillue	13,2	7,9	34595	20715	-5,3	-13879
Forêt mixte	30,8	35,5	80972	93250	4,7	12278
Régénération forestière	8,6	9,6	22488	25173	1,0	2686
Milieu agricole	6,2	6,7	16216	17473	0,5	1258
Coupes forestières et sols nus	2,3	1,9	5977	5049	-0,4	-928
Milieu humide	5,5	6,1	14513	16028	0,6	1516
Dunes et plages	1,2	0,5	3132	1430	-0,7	-1702
Eau	9,2	10,4	24053	27240	1,2	3188
Milieu urbanisé	0,7	0,5	1864	1250	-0,2	-614
Hauts-fonds	0,6	0,4	1479	1069	-0,2	-410
Nuages	1,7	0,4	4582	1132	-1,3	-3450
Non-classés	0,5	3,7	1366	9756	3,2	8390
TOTAL	100	100	262607	262609		

l'intérieur et à l'extérieur du PNK. On doit cependant noter que le PPCC pour la forêt résineuse est de 89,9 % sur l'image MSS et de 98,0 % sur l'image TM.

- étonnamment, la superficie couverte par les **coupes forestières et sols nus** n'a pas augmenté de façon significative entre 1977 et 1993, même si on a constaté de nombreuses coupes forestières récentes (où le sol est nu entre les souches) et plusieurs tourbières exploitées (où le sol est nu) lors des vérifications sur le terrain. On observe plutôt une diminution de 0,4 %. Les tourbières sont exploitées depuis 1978 seulement (Shaw, 1986). On observe toutefois que le PPCC pour les coupes forestières et sols nus est de 87,1 % sur l'image MSS et de 93,6 % sur l'image TM. En confrontant les observations faites sur le terrain (nombreuses coupes récentes et tourbières exploitées) aux résultats obtenus ici (une diminution de superficie de 0,4%), on peut supposer une sur-évaluation de la superficie couverte par cette classe en 1977. Nous ne pouvons en effet vérifier les coupes forestières et les sols nus de 1977 qu'à l'aide de cartes forestières ou de photographies aériennes qui ne couvrent pas complètement le territoire étudié sur les images MSS et TM.
- l'augmentation du pourcentage d'**eau** (1,2 %) qui pourrait être attribué au fait que la résolution de 30 m du capteur TM permet de percevoir les cours d'eau étroits que MSS ne perçoit pas. Encore une fois, la présence de nouveaux barrages de castors peut avoir provoqué l'élargissement de certains cours d'eau; la population de castors dans le secteur a, en effet, plus que doublé de 1977 à 1993 (Poulin, 2001). On remarquera que le PPCC est particulièrement élevé, soit 99,1 % pour l'image MSS et 99.9 % pour l'image TM.
- Les secteurs en **régénération forestière** se sont accrus de 1,0 %. On a constaté, lors des visites sur le terrain, de nombreux secteurs où les souches n'étaient pas fraîchement coupées et où la végétation arbustive régnait. Plusieurs anciens champs (friches agricoles) étaient également envahis par la végétation arbustive. Il est étonnant d'obtenir un si faible accroissement de superficie. Comme les sites d'entraînement pour cette classe quelque peu "subjective" ne pouvaient être choisis et vérifiés qu'à l'aide de photographies aériennes des années 1973 et 1974, l'identification de sites de régénération forestière devenait elle-même subjective

(i.e. pourrait être perçue différemment d'un photo-interprète à un autre). La superficie couverte par la régénération forestière en 1977 peut donc avoir été sur-évaluée, si l'on considère que les résultats obtenus pour l'image TM sont plus crédibles. On doit cependant tenir compte du fait que le pourcentage de pixels correctement classifiés (PPCC) pour la régénération forestière est de 68,8 % pour l'image MSS et 79,6 % pour l'image TM.

- la classe **dune et plage** diminue de -0,7. On dénote cependant que le PPCC est de 70,7 % pour l'image MSS et de 81,8 % pour l'image TM. Pour cette classe, il est possible que la forme de la dune ait varié mais sa superficie a probablement peu changé. C'est un milieu dynamique. La hauteur de la marée sur chacune des images peut également influencer la superficie de plage exposée.
- l'augmentation de 0,6 % du **milieu humide** pourrait également être expliquée par la meilleure performance du capteur TM (comparativement à MSS). On observe toutefois qu'au cours des années 1980 (Shaw, 1986), des tourbières, où le sol est nu, sont en exploitation dans la ZIC. Les deux zones rouges (figure 49), au nord et au sud de la limite du PNK, situées à une longitude similaire sur l'image TM, sont des tourbières exploitées. Sur l'image MSS, ces deux zones rouges sont absentes et seule la classe **milieu humide** apparaît dans ce secteur. Comme on peut supposer la présence d'autres petites tourbières exploitées dans la ZIC, on aurait pu s'attendre à une diminution de la superficie occupée par le milieu humide. Nous devons toutefois mentionner que le PPCC pour le milieu humide est de 92,1 % pour l'image MSS et de 76,6 % pour l'image TM.
- la classe **milieu agricole** augmente de 0,5 % en superficie. On dénote cependant que le PPCC est de 79,2 % pour l'image MSS et de 64,8 % pour l'image TM. Des sites d'entraînement de piètre qualité pourraient expliquer le faible PPCC pour l'image TM. Nous ne possédons pas de données précises (par exemple, des données provenant du ministère de l'Agriculture du Nouveau-Brunswick) sur le développement du milieu agricole à l'intérieur de la limite des bassins versant. Il est par conséquent difficile de juger si la variation de superficie obtenue est le reflet de la réalité.

- le **milieu urbanisé** diminue de 0,2 % en superficie. Le PPCC est particulièrement bas pour les deux images. Il est de 42,4 % sur l'image MSS et de 52,0 % sur TM. Le choix des sites d'entraînement était, pour cette classe, particulièrement difficile. On devait sélectionner minutieusement chaque pixel car ils ressortaient peu parmi les autres pixels, particulièrement sur l'image MSS (résolution spatiale de 80 m). Il est étonnant d'obtenir un si faible accroissement du milieu urbanisé si l'on considère que plusieurs petits villages se sont étendus de 1977 à 1993. Le choix de sites d'entraînement inappropriés peut avoir engendré une sur-évaluation du milieu urbanisé pour l'image MSS et une sous-évaluation pour l'image TM.
- les **hauts-fonds** subissent une diminution de 0,2 %. On observera toutefois que le PPCC est de 74,4 % pour l'image MSS et de 94,6 % pour l'image TM. Les hauts-fonds sont un milieu dynamique. Il est possible qu'ils aient changé de forme de 1977 à 1993 mais il est peu probable qu'ils aient radicalement changé en superficie. La faible diminution de superficie peut être due à une hauteur de marée légèrement différente entre les deux images.
- sur l'image MSS, les **nuages** occupent une superficie de 4582 hectares. Sur l'image TM, ils occupent 1132 hectares.
- sur l'image MSS, les pixels non-classés occupent une superficie de 1366 hectares. Sur l'image TM, ils occupent 9756 hectares.

Comme pour les superficies à l'intérieur du PNK (tableau 4), les classes **milieu humide**, **dunes/plages** et **eau** doivent être considérées, selon nous, comme des milieux significatifs pour vérifier la justesse des résultats obtenus. Ces milieux ont fort probablement peu changé entre 1977 et 1993, même s'ils sont à l'extérieur des limites du PNK.

On peut considérer les classes **coupes forestières**, **sols nus** et **régénération forestière** comme étant étroitement reliées. En effet, comme la superficie des **coupes forestières et sols nus** n'a pas changé radicalement (-0,4 %) malgré les

nombreuses coupes récentes observées lors des visites sur le terrain et que la **régénération forestière** est demeurée relativement stable (+1 %), on peut penser qu'il y a un équilibre entre les superficies coupées et celles qui se régénèrent. Par conséquent, on peut prétendre qu'il y a une certaine constance dans les superficies coupées annuellement. D'après Fowler (2001), les superficies coupées sont gérées selon la capacité de renouvellement annuel du milieu forestier. Les données numériques sur l'exploitation forestière, compilées en 1984, fournies par le ministère des Ressources naturelles et de l'Énergie du Nouveau-Brunswick (Fowler, 2000), étaient très volumineuses et ne permettaient pas d'étudier l'évolution des superficies coupées annuellement. De plus, elles auraient exigé un temps de traitement considérable avant d'être utilisables dans cette étude.

Étant donné que la classe **forêt mixte** est composée de feuillus et de résineux, il est compréhensible que lors de la classification, il y ait une petite variation au niveau des paramètres statistiques utilisés lors de la classification des deux images. En fait, un peuplement de feuillus ou de résineux pourrait être classifié "mixte" si celui-ci est à la limite des paramètres statistiques de cette classe.

Les variations de superficies mentionnées précédemment doivent cependant être considérées avec discernement car la piètre séparabilité des signatures spectrales ne permet pas d'identifier avec certitude les différents types d'utilisation du sol. Les classes milieu urbanisé, dunes/plages, milieu agricole et régénération forestière sont des exemples de classes où le pourcentage de pixels correctement classifiés est plus faible que pour les autres classes et ce, pour les deux images (MSS et TM) (tableau 3). Les superficies occupées par chaque types d'utilisation du sol pourraient donc varier si l'on parvenait à augmenter le pourcentage de pixels correctement classifiés. Une analyse visuelle des images classifiées permet de constater que même si les pourcentages de variation sont faibles, c'est souvent la répartition des différentes utilisations du sol qui a changé, particulièrement en milieu forestier. Les figures 7 et 8

illustrent les changements de la répartition des forêts résineuse (vert foncé) et feuillue (jaune) dans le sud-est des images MSS et TM.

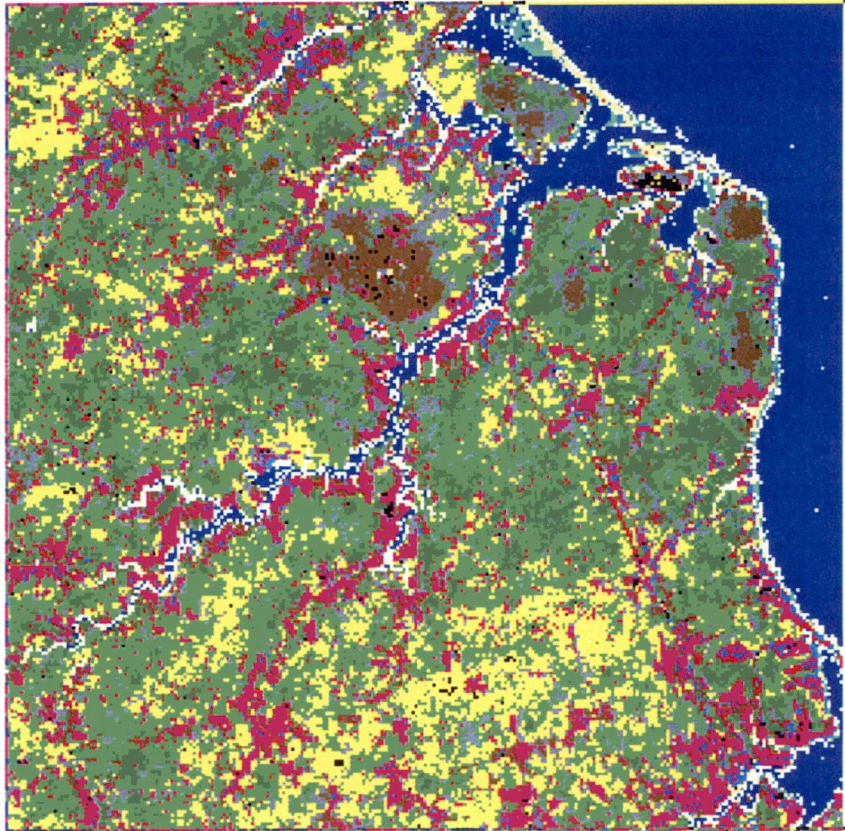


Figure 7 - Répartition de la forêt feuillue (jaune) et résineuse (vert foncé) au sud-est de l'image MSS de Landsat. Le nord correspond à la partie supérieure de la figure.

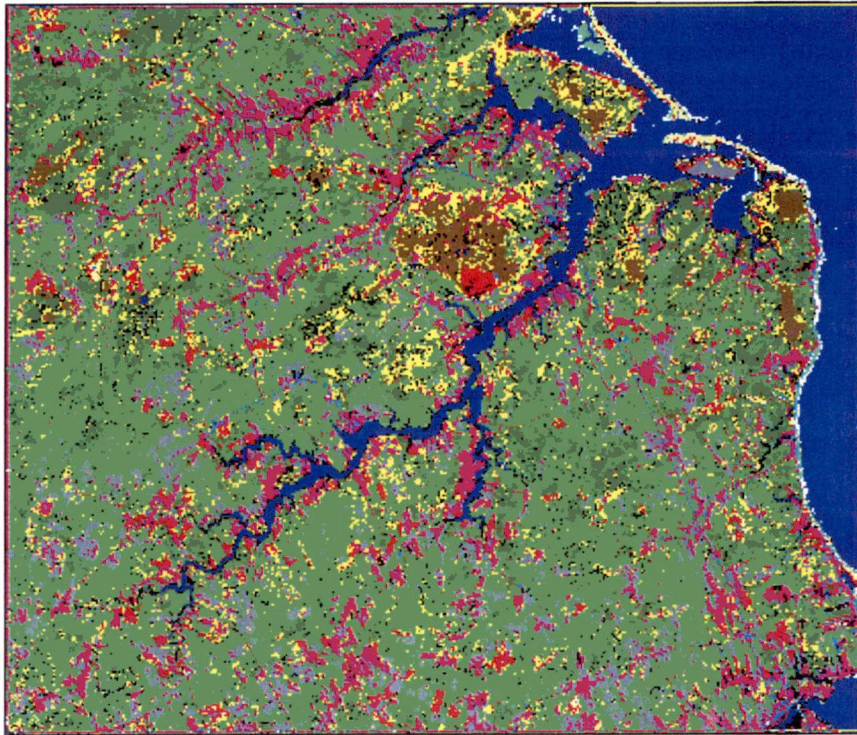


Figure 8 - Répartition de la forêt feuillue (jaune) et résineuse (vert foncé) au sud-est de l'image TM de Landsat. Le nord correspond à la partie supérieure de la figure.

Légende :

	Forêt résineuse
	Forêt feuillue
	Forêt mixte
	Régénération forestière
	Milieu agricole
	Coupes forestières et sols nus
	Milieu humide
	Dunes et plages
	Eau
	Milieu urbanisé et sols nus
	Hauts-fonds
	Nuages
	Non-classés

Quant au niveau d'apport des photographies aériennes, les échelles variant de 1:10 000 à 1:20 000 se sont avérées les plus efficaces pour identifier et délimiter les différents types d'utilisation du sol, particulièrement en milieu forestier (i.e.: forêt résineuse, feuillue, mixte, régénération forestière, coupes forestières et sols nus). À ces échelles, il faut cependant un grand nombre de photographies pour couvrir une petite surface. Les photographies aériennes ayant des échelles de 1:30 000 à 1:50 000 rendent difficile l'identification des milieux forestiers mais permettent habituellement l'identification et la délimitation des autres types d'utilisation du sol tels les milieux agricole, urbanisé et humide ainsi que les hauts-fonds, l'eau, les dunes et plages. La figure 9 donne un aperçu de ce que l'on peut distinguer sur une photographie aérienne au 1:40 000. Les visites sur le terrain, ou des cartes forestières, sont très utiles pour identifier avec certitude les milieux forestiers, ces derniers étant plutôt hétérogènes (i.e. rarement purs).

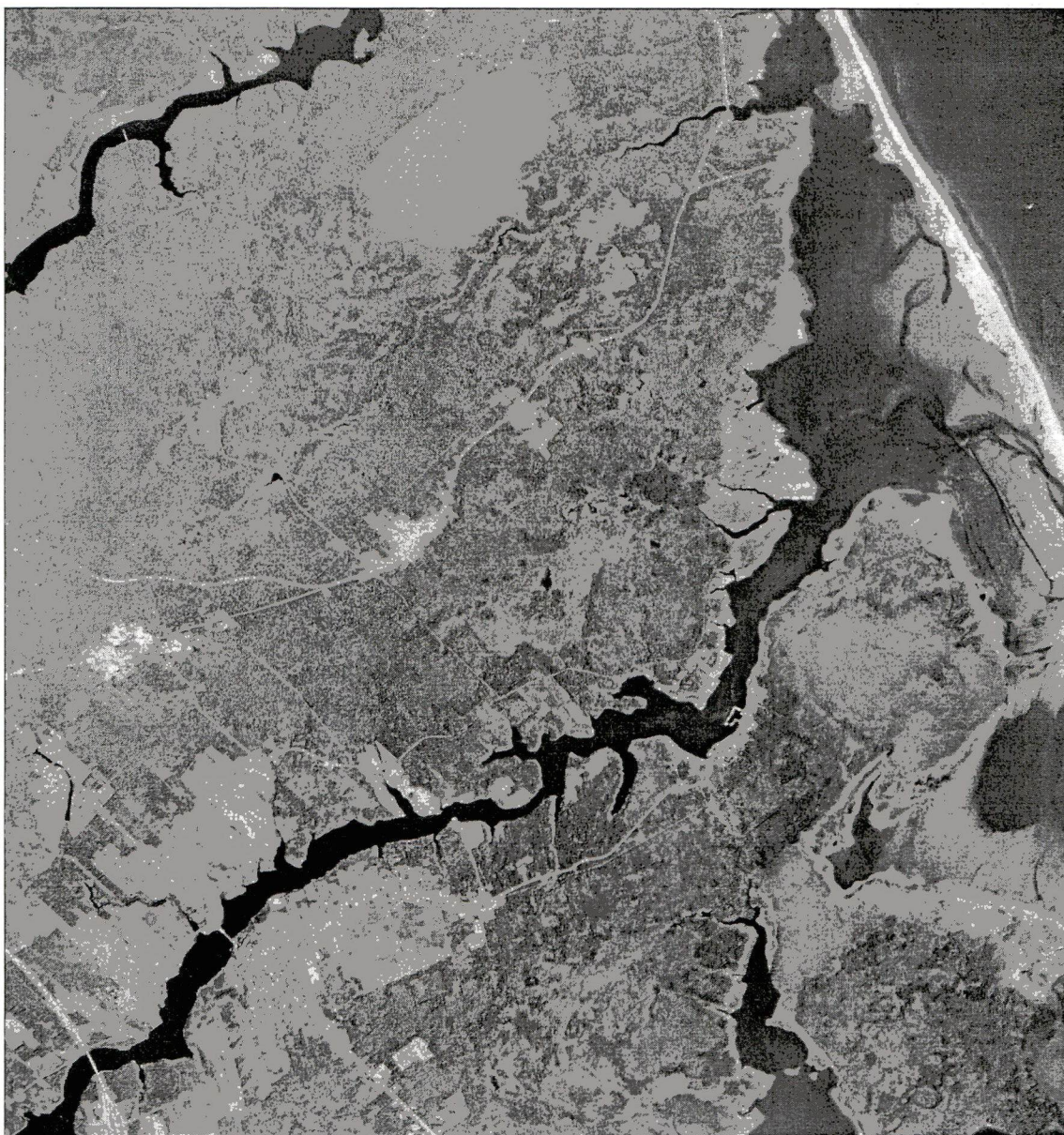


Figure 9 - Aperçu des classes distinguables sur une photographie aérienne au 1:40 000 (échelle approximative) dans le secteur de Saint-Louis-de-Kent. Photographie aérienne A26690 - 62. (1985).

5.1. Analyse qualitative des classes par photographies aériennes et images-satellite

Dans les prochaines pages, nous analyserons chacune des classes du tableau 2 à l'aide de photographies aériennes et des portions correspondantes des images MSS et TM classifiées pour le PNK et la ZIC. On pourra ainsi comparer la réalité, passée ou actuelle, identifiable sur les photographies aériennes et les résultats obtenus par la classification des images-satellite. Elle permet d'apprécier qualitativement l'identification et la délimitation des différents types d'utilisation du sol.

Les figures 10, 11 et 12 permettent de comparer la **forêt résineuse** pour chacune des images. On observe que la géométrie des trois peuplements de résineux (vert foncé) est relativement similaire sur les figures 11 (image MSS) et 12 (image TM) et reflète assez fidèlement la réalité présente sur la photographie aérienne. Toutefois, le peuplement de conifères est plus "pur" (i.e. presque exclusivement composé de pixels vert foncé) sur l'image MSS alors que sur l'image TM il est moins clairement délimité et inclut des pixels des classes **milieu humide** (brun-jaune) et **forêt feuillue** (jaune). En consultant les figures 11 et 12, on doit tenir compte du fait que le pourcentage de pixels correctement classifiés (PPCC) est de 89,9 % sur l'image MSS et 98 % sur l'image TM.

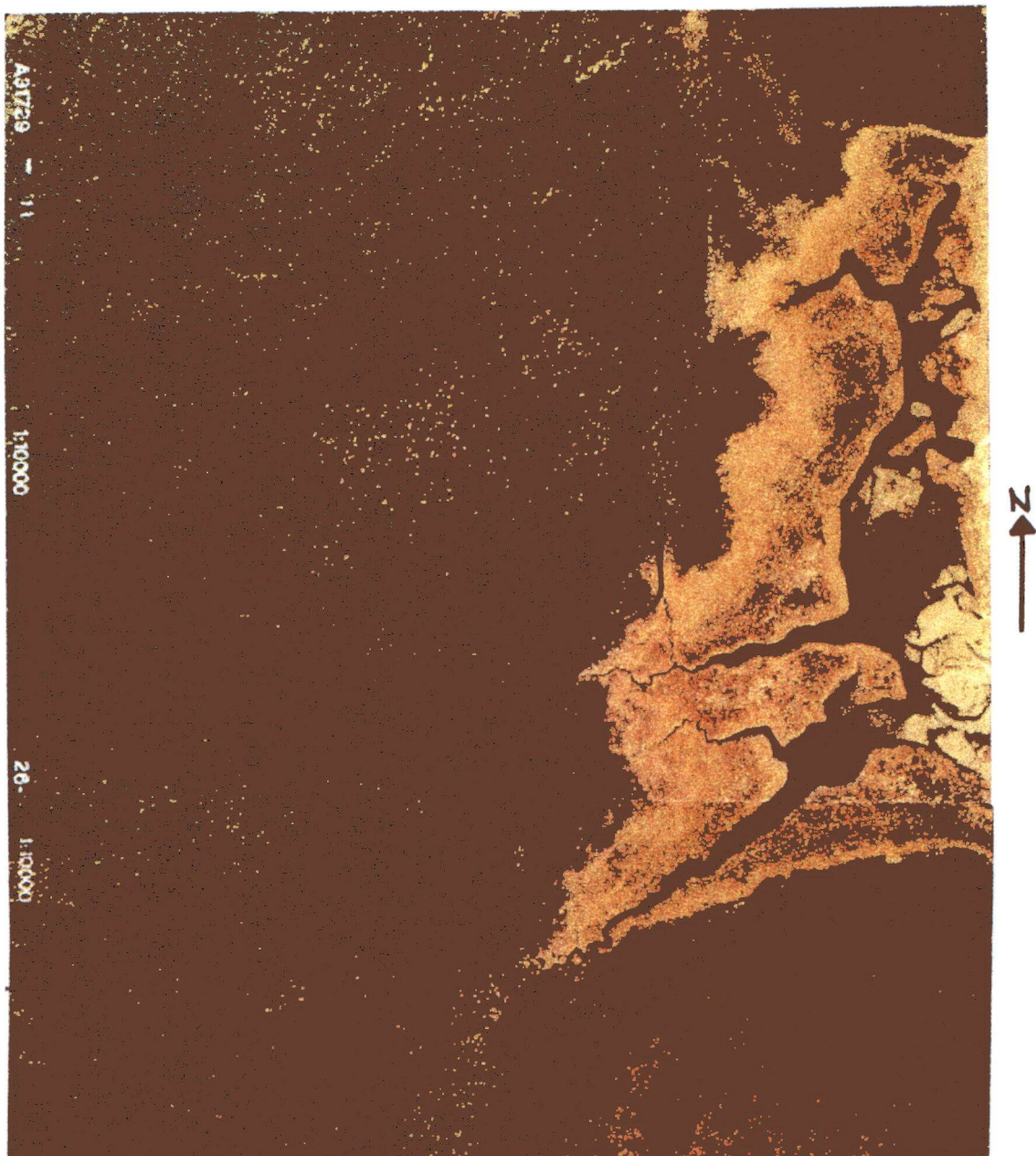


Figure 10 - Forêt résineuse. Secteur du Pré à Germain (Le Barachois). Photos aériennes A31729 - 11 et A31729 - 12. (1995). Échelle approximative : 1:10 000.

Légende :

	Forêt résineuse
	Forêt feuillue
	Forêt mixte
	Régénération forestière
	Milieu agricole
	Coupes forestières et sols nus
	Milieu humide
	Dunes et plages
	Eau
	Milieu urbanisé et sols nus
	Hauts-fonds
	Nuages
	Non-classés

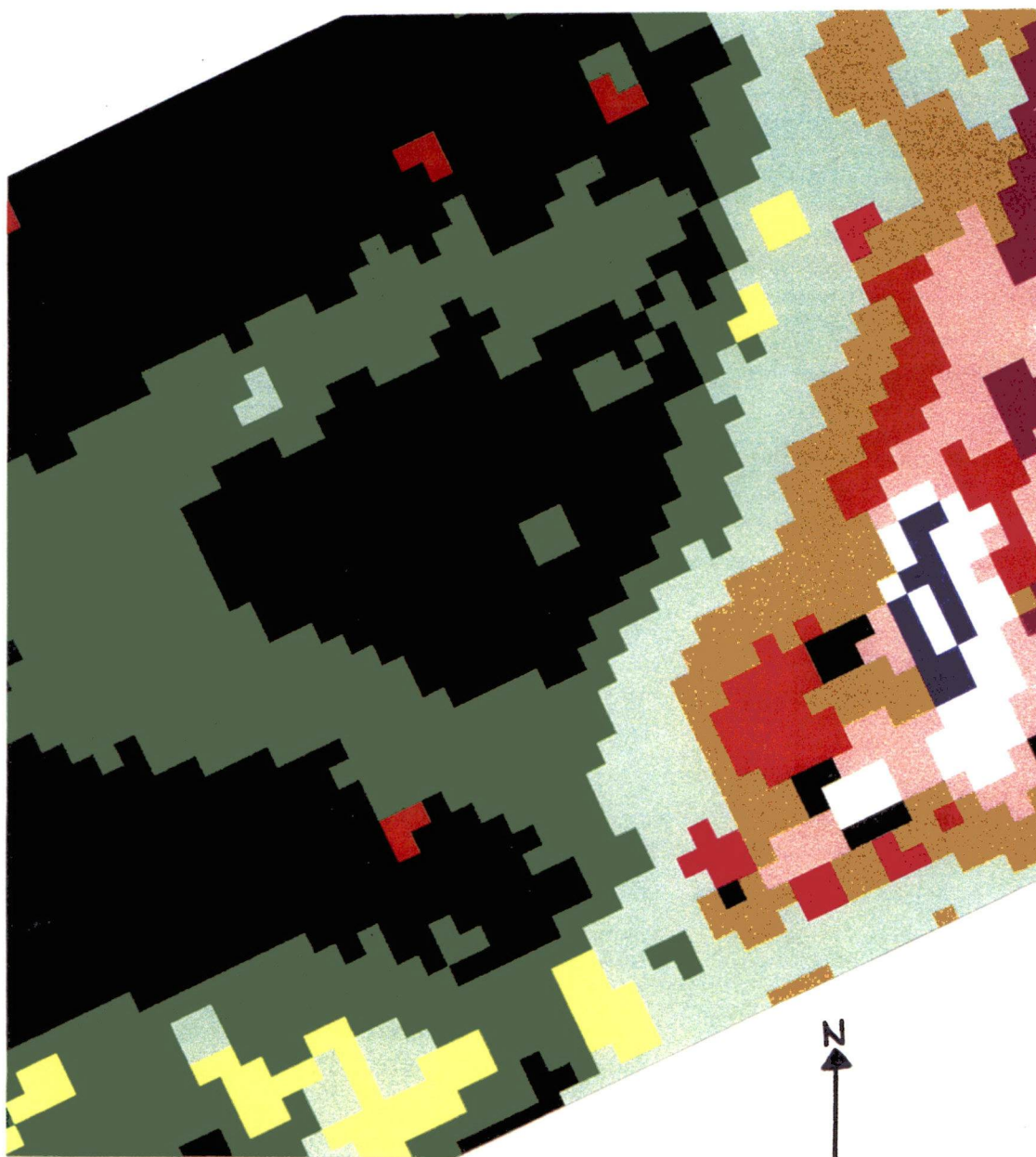


Figure 11 - Forêt résineuse. Secteur du Pré à Germain (Le Barachois). Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59.

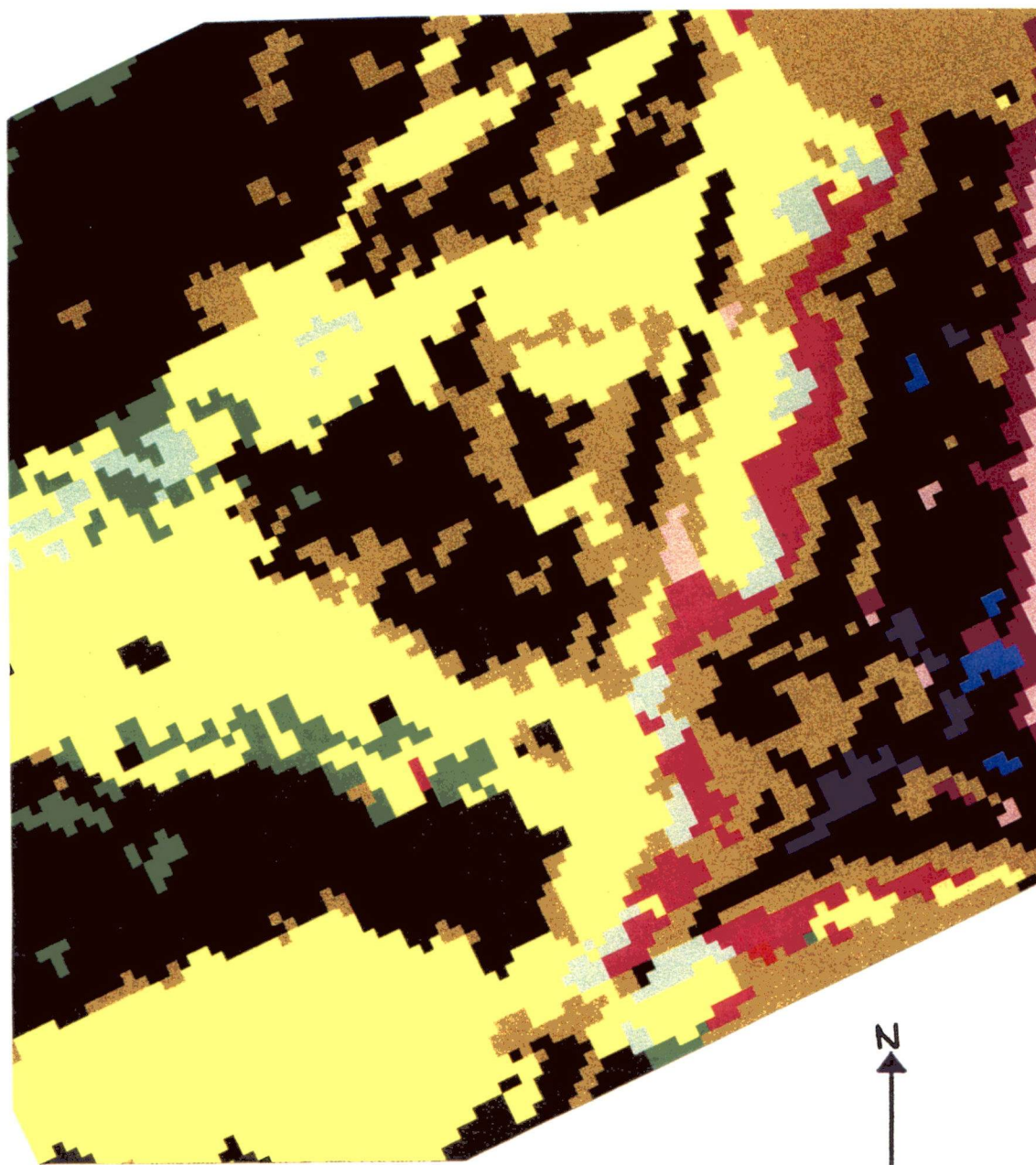


Figure 12 - Forêt résineuse. Secteur du Pré à Germain (Le Barachois). Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59.

Les figures 13, 14 et 15 montrent la **forêt feuillue** (jaune). La géométrie des peuplements est similaire sur les deux images (figures 14 et 15). Cependant, le peuplement de feuillus sur l'image MSS est identifié comme un peuplement principalement composé de **forêt mixte** (vert vif) sur l'image TM. La photographie aérienne et les visites sur le terrain montrent ce secteur comme étant surtout composé de feuillus. Souvenons-nous que le PPCC pour la forêt feuillue est de 76,5 % sur l'image MSS et de 99,5 % sur l'image TM. Pour la forêt mixte, le PPCC est de 73,8 % sur l'image MSS et de 93,7 % sur l'image TM.

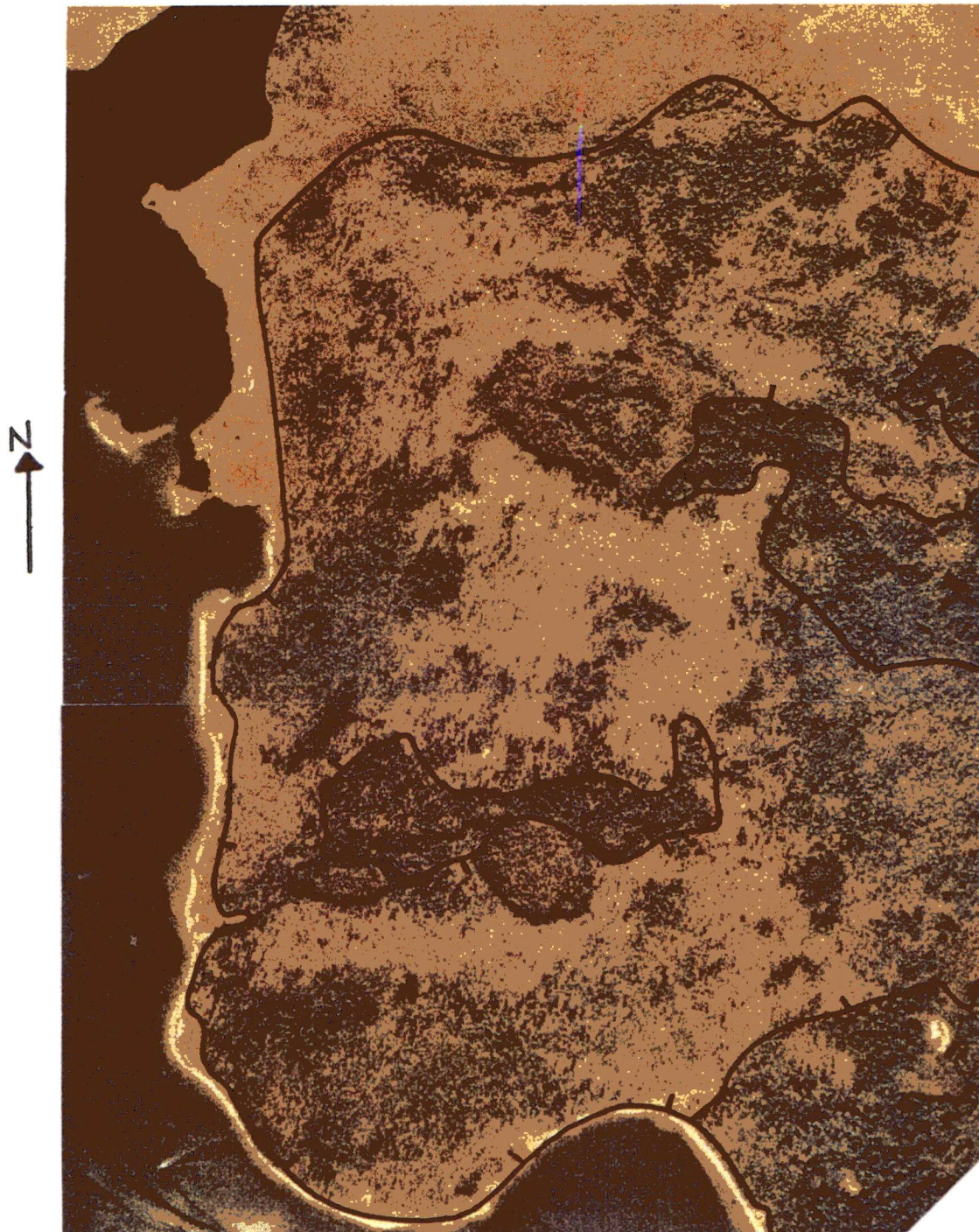


Figure 13 - Forêt feuillue. Péninsule d'Aldouane (sud du PNK). Photos aériennes A31728 - 118 et A31728 - 119. (1995). Échelle approximative : 1:10 000.

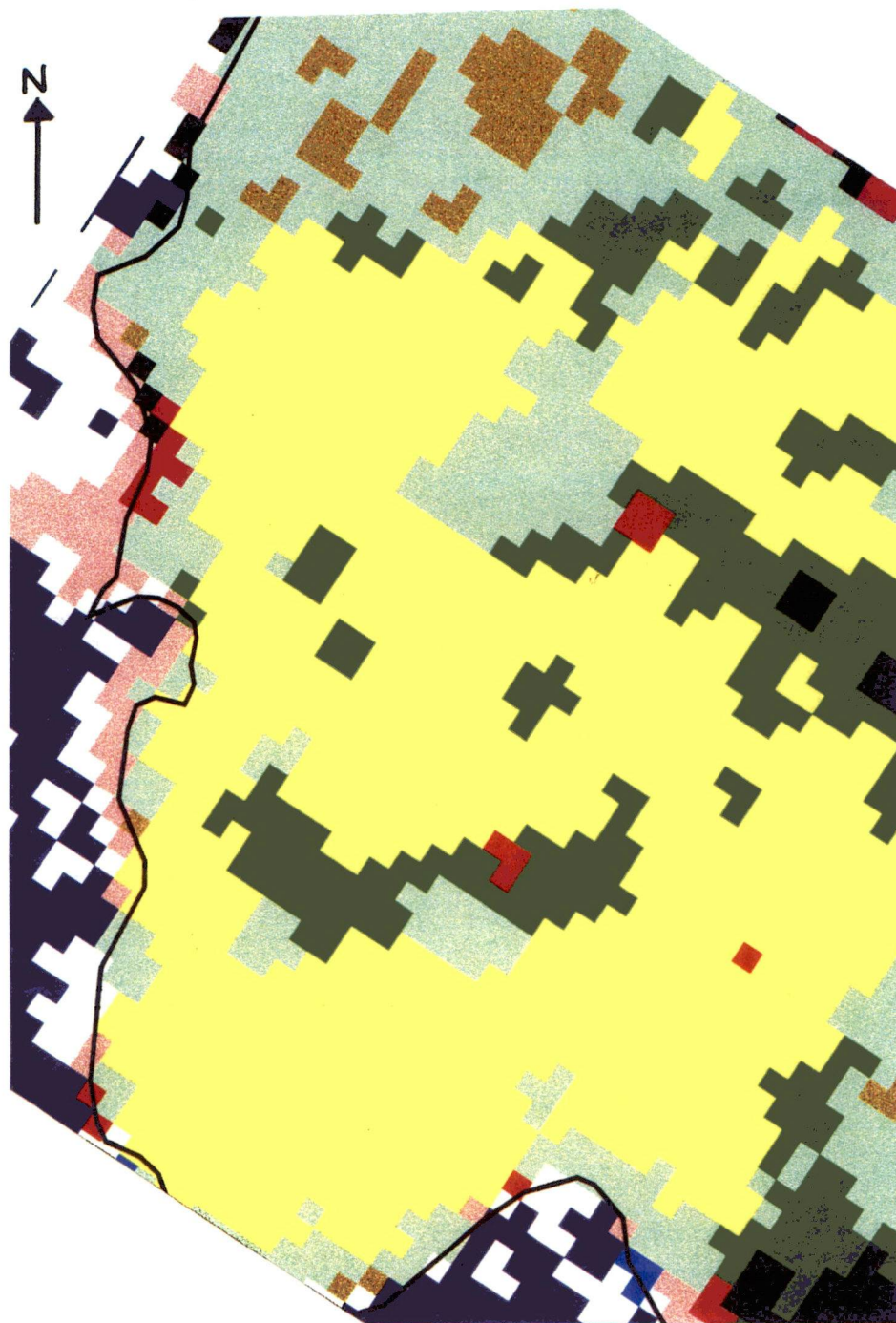


Figure 14 - Forêt feuillue. Péninsule d'Aldouane (sud du PNK). Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59. La ligne noir est la limite du PNK; elle ne sert pas à délimiter les types d'utilisation du sol.

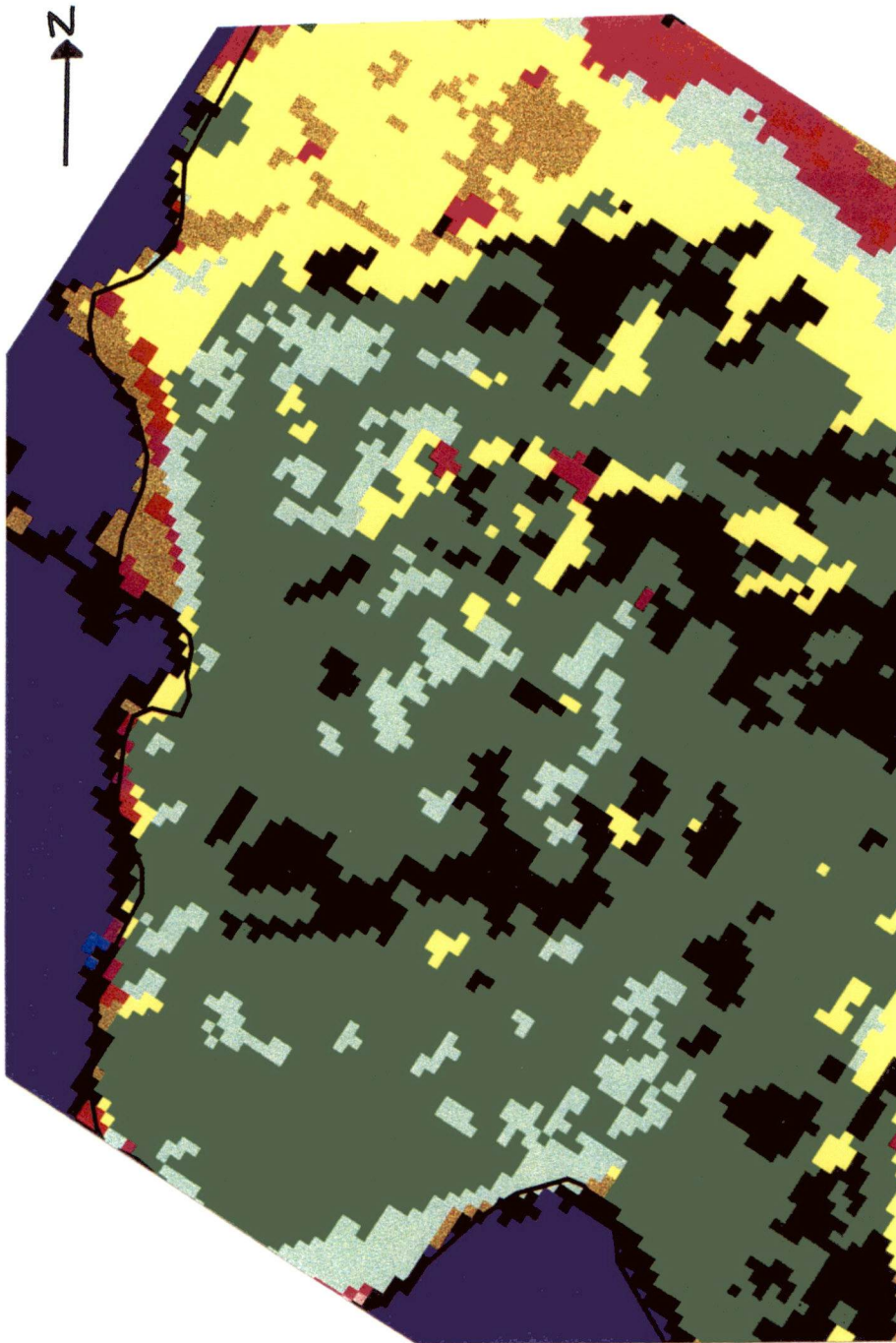


Figure 15 - Forêt feuillue. Péninsule d'Aldouane (sud du PNK). Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59. La ligne noir est la limite du PNK; elle ne sert pas à délimiter les types d'utilisation du sol.

Les figures 16, 17 et 18 confrontent les résultats obtenus pour la **forêt mixte** (vert vif). La configuration du peuplement est globalement similaire sur les images MSS (figure 17) et TM (figure 18). De façon générale, les peuplements sont classés comme mixtes sur les deux images. On remarque toutefois une présence accrue de la forêt mixte en bordure de la tourbière sur l'image MSS. Cela peut être dû au fait qu'un fort pourcentage de pixels situés en bordure de tourbières (brun-jaune) ont été inclus dans les sites d'entraînement de la forêt mixte, la résolution spatiale de 80 m de l'image MSS ne permettant pas toujours de délimiter avec exactitude la limite entre deux types d'utilisation du sol. Par conséquent, les secteurs ayant des signatures spectrales similaires ont été finalement classés dans la **forêt mixte**. Il faut également tenir compte du fait que le PPCC pour la forêt mixte est de 73,8 % sur l'image MSS et de 93,7 % sur l'image TM. Les photographies aériennes et les visites sur le terrain montrent le secteur comme étant effectivement composé d'une zone de forêt mixte et d'une zone de conifères.

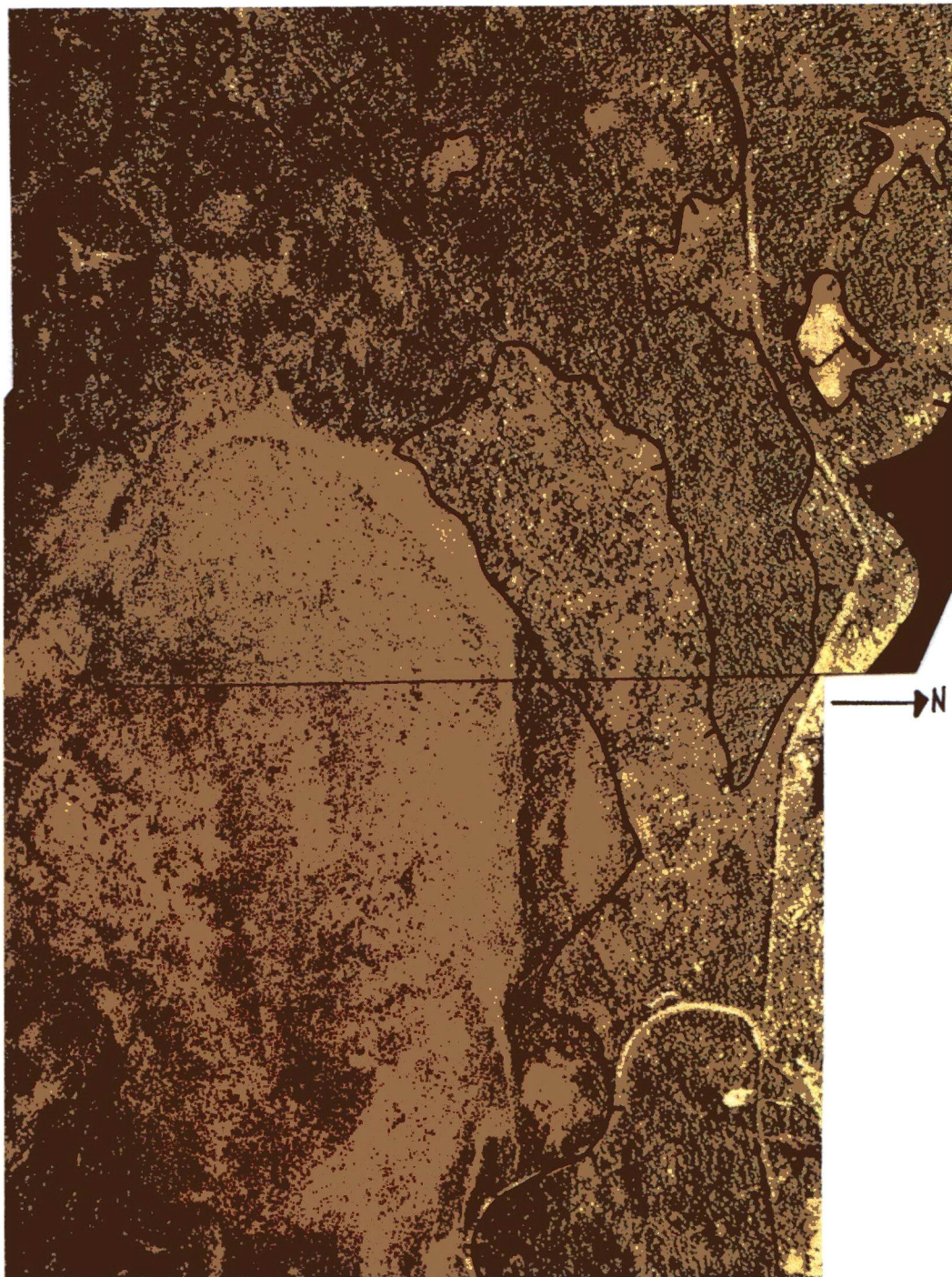


Figure 16 - Forêt mixte. Secteur South Kouchibouguac. Photos aériennes A31728 - 82 et A31728 - 108 . (1995). Échelle approximative : 1:10 000.

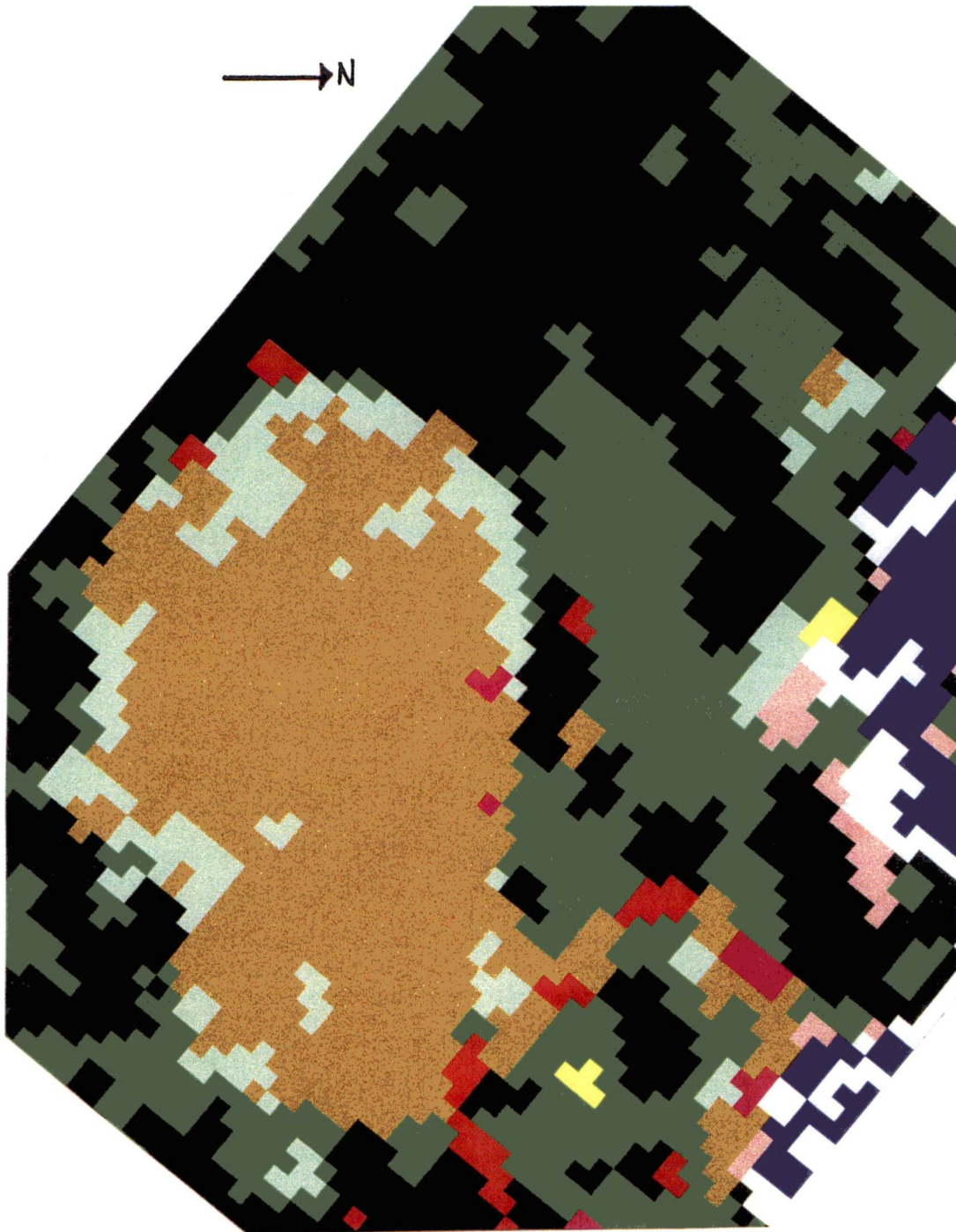


Figure 17 - Forêt mixte. Secteur South Kouchibouguac. Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59.

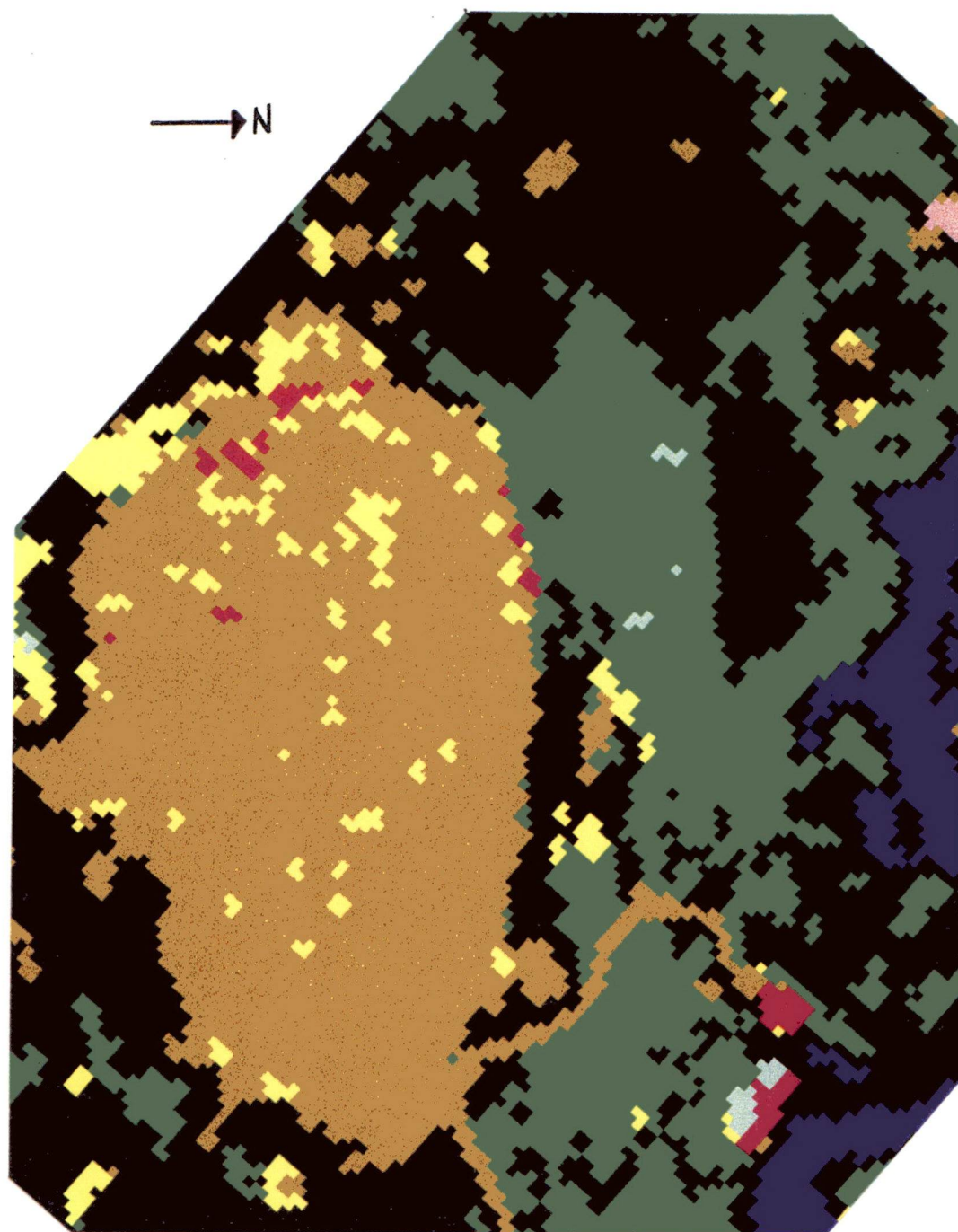


Figure 18 - Forêt mixte. Secteur South Kouchibouguac. Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59.

Les figures 19, 20, 21 et 22 nous permettent de comparer des secteurs en **régénération forestière** en 1977 et 1993. En comparant la photographie aérienne de 1974 (figure 19), sur laquelle apparaît deux zones de coupes relativement récentes, à l'image MSS (figure 20), on constate que ces zones sont en régénération en 1977. La géométrie des zones en régénération n'est toutefois pas identique sur les deux figures. Les coupes forestières se sont peut-être poursuivies de 1974 à 1977. Cela expliquerait la présence de rouge (coupes forestières et sols nus) entre les deux principales zones en régénération (figure 20). Le PPCC pour la régénération forestière est de 68,8 % sur l'image MSS. La figure 21 permet de comparer un secteur en régénération en 1995 au même secteur en 1993 (figure 22). On observe plusieurs zones en régénération (vert clair) où la classe **milieu agricole** (rose foncé) est également présente. Une forêt en régénération et un secteur agricole où la végétation est relativement longue (friche) peuvent présenter des signatures spectrales similaires pendant quelques années. Les photographies aériennes et les visites sur le terrain confirment que cette zone, en bordure du PNK, a récemment (5 à 7 ans) subi de nombreuses coupes. La géométrie du secteur en régénération présent sur l'image TM représente assez fidèlement la disposition de celui-ci sur la photographie aérienne. Le PPCC pour la régénération forestière, sur l'image TM, est de 79,6 %.

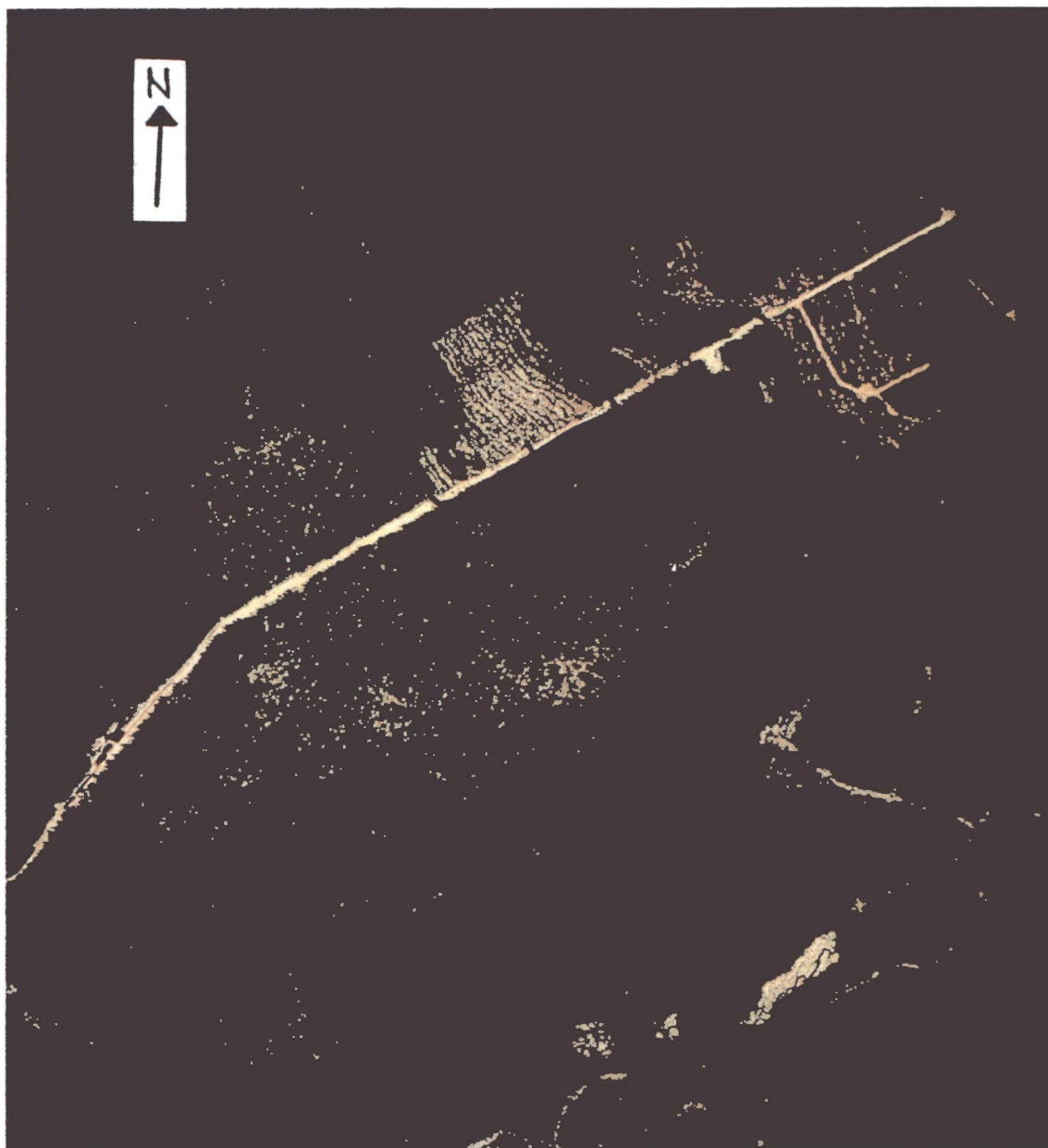


Figure 19 - Régénération forestière. Secteur au nord du village de Kouchibouguac, à l'ouest de la limite du PNK. Photo aérienne A30954 - 162 . (1974).
Échelle approximative: 1:10 000.

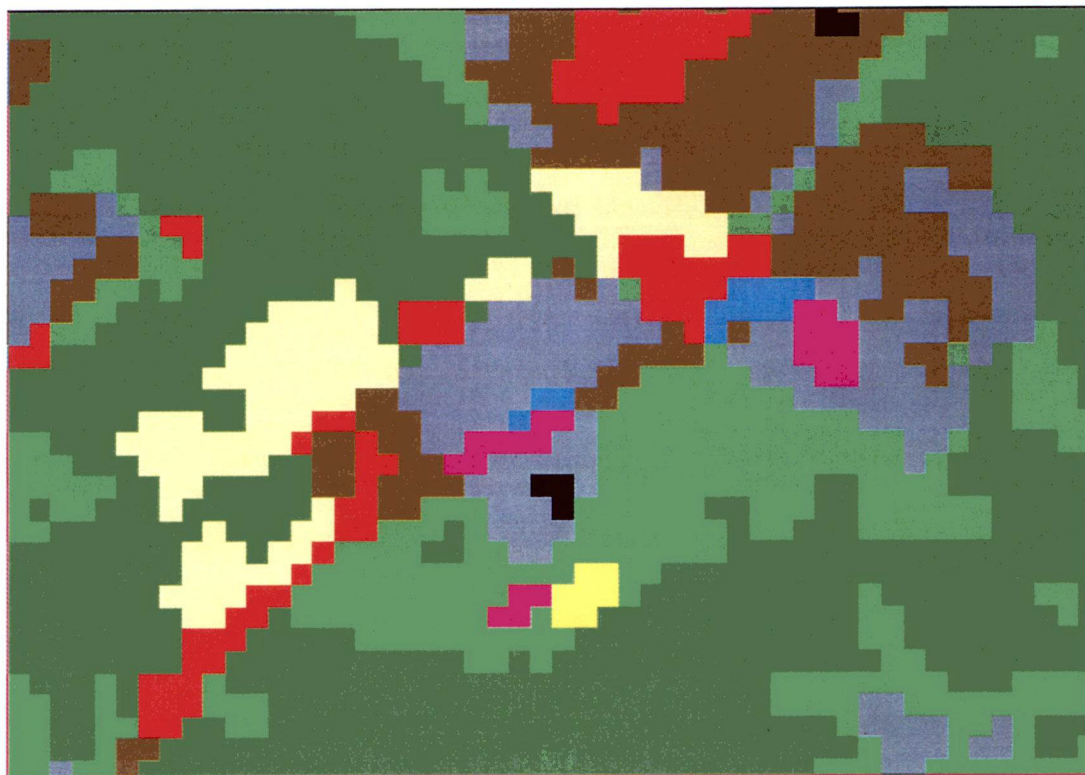


Figure 20 - Régénération forestière (en gris). Secteur au nord du village de Kouchibouguac, à l'ouest de la limite du PNK. Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59. Le nord correspond à la partie supérieure de la figure.

(Note : la figure ci-dessus a été obtenue par un processus différent des autres figures. Les secteurs en régénération devraient apparaître en vert clair plutôt qu'en gris. Les autres couleurs peuvent aussi apparaître différemment des autres croquis)

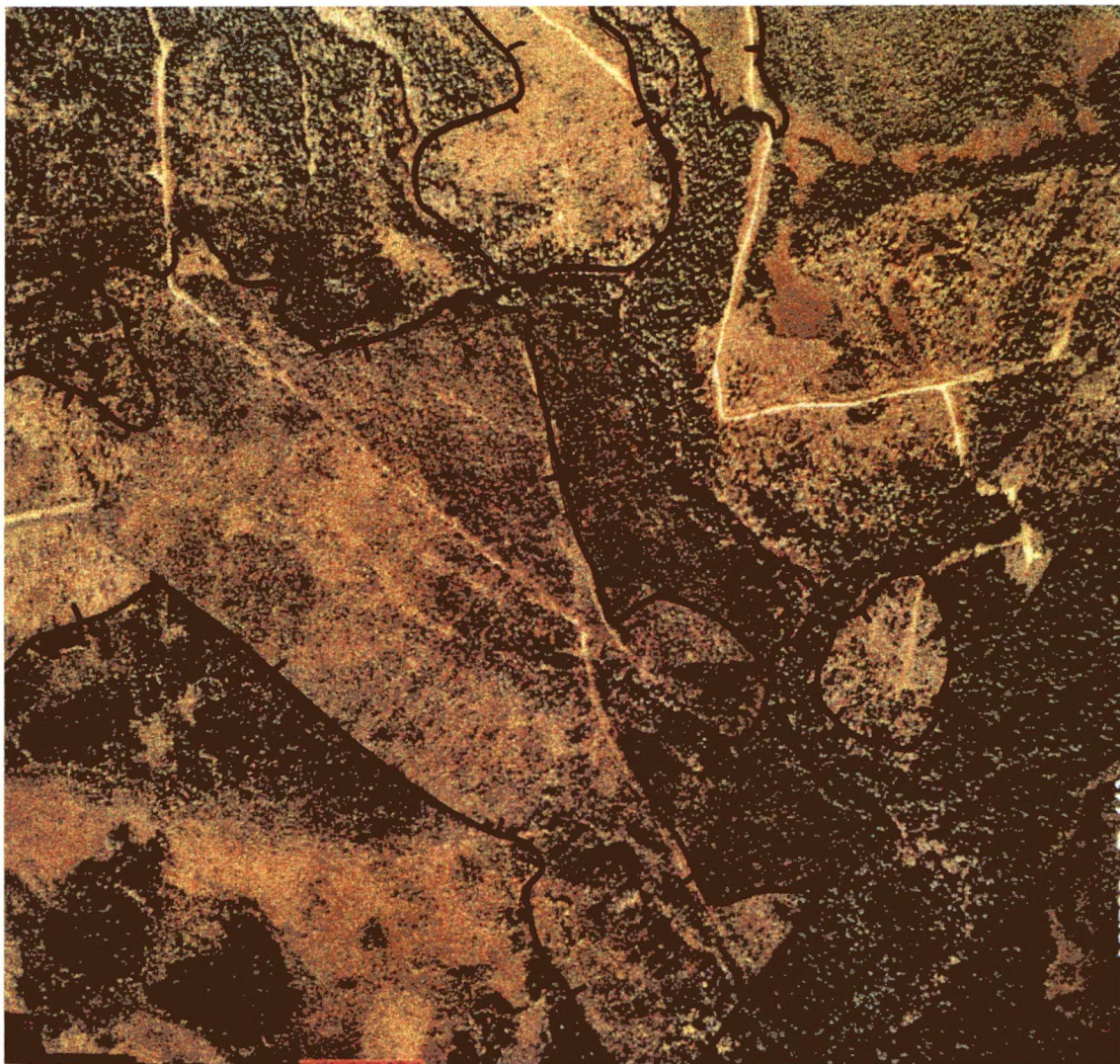


Figure 21 - Régénération forestière. Secteur Black River (limite ouest du PNK).
Photo aérienne A31728 - 143. (1995).
Échelle approximative : 1:10 000.

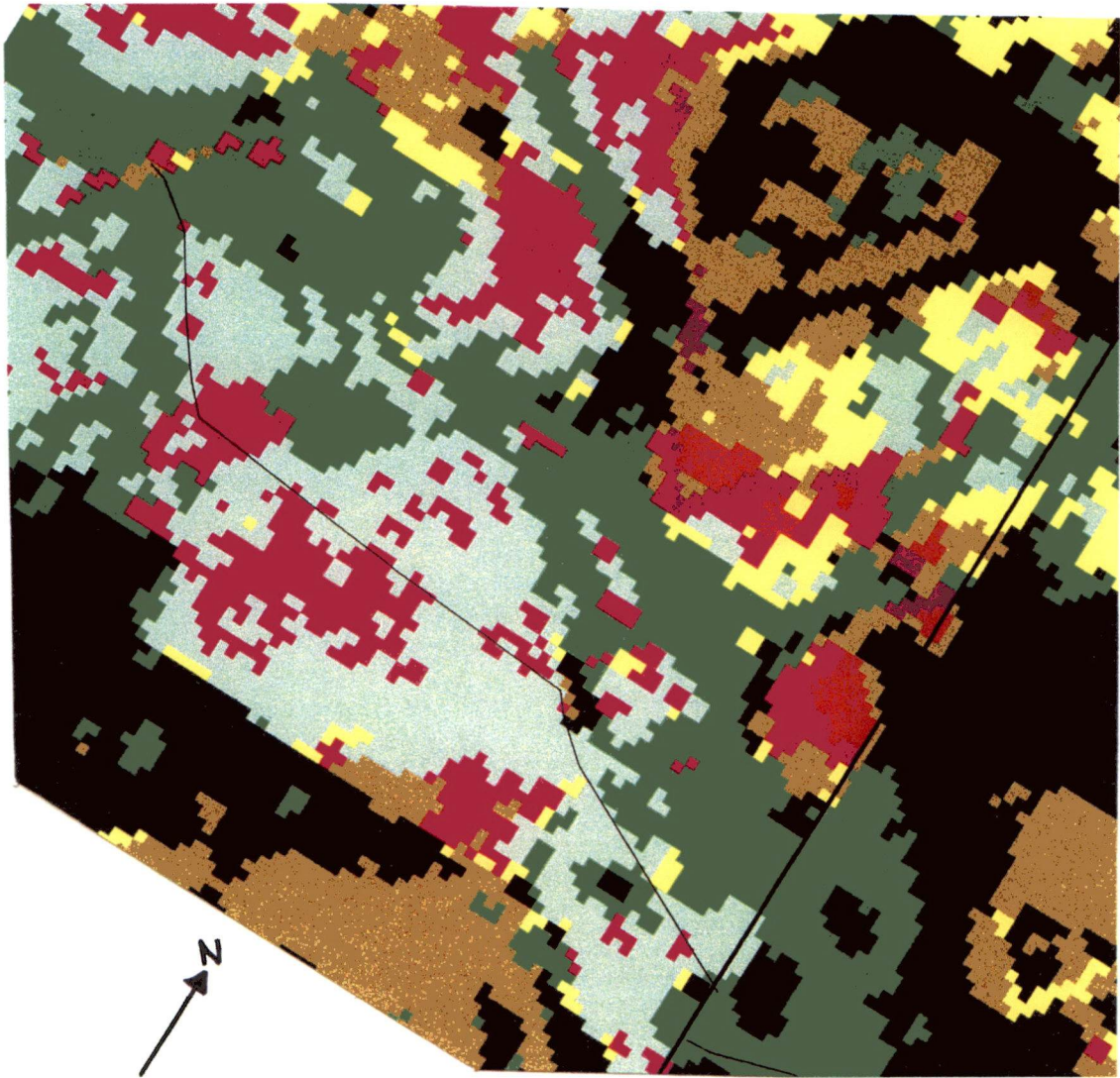


Figure 22 - Régénération forestière. Secteur Black River (limite ouest du PNK). Image TM de Landsat classifiée (1993). Le mince trait noir est un chemin forestier. Le large trait noir est la limite du PNK. Voir la légende à la page 59.

Les figures 23, 24 et 25 montrent les résultats obtenus pour la classe **milieu agricole** (rose foncé). La figure 25 (image TM) montre, conformément à la réalité observée sur le terrain et sur la photographie aérienne, un secteur surtout agricole (rose foncé). L'image MSS propose, pour ce secteur, un amalgame d'autres classes comprenant principalement le **milieu humide** (brun-jaune), la **régénération forestière** (vert clair), la **forêt feuillue** (jaune) et le **milieu urbanisé/sols nus** (mauve). En fait, la géométrie des champs, facilement identifiable sur la photographie aérienne, y est presque absente. La géométrie du milieu agricole est un peu plus discernable sur l'image TM. De plus, la classe milieu agricole apparaît plus "pure" (i.e. composée presque uniquement de rose foncé) sur l'image TM que sur l'image MSS. Sur l'image TM, la zone de transition entre les champs et la forêt se retrouve dans la classe **régénération forestière** (vert clair). Cette zone de transition est presque absente sur l'image MSS. Cependant, sans la présence du réseau routier vectoriel sur les figures 24 et 25, il serait quelque peu difficile de se localiser ou de s'orienter. Considérons enfin que le PPCC est de 79,2 % sur l'image MSS et de 64,8 % sur l'image TM pour la classe **milieu agricole**.



Figure 23 - Milieu agricole. Secteur du village de Saint-Charles. Photo aérienne 73023 - 172. (1973). Échelle approximative : 1:10 000.

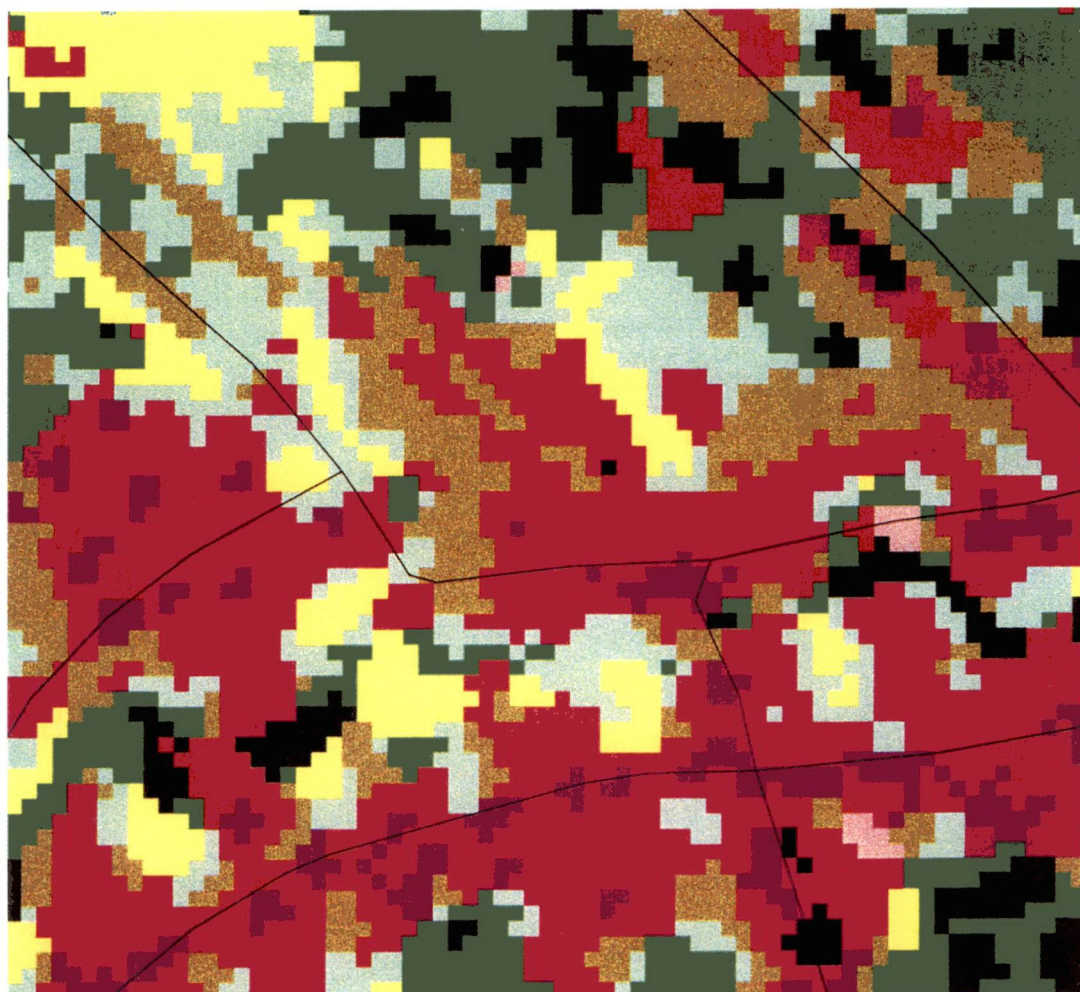


Figure 24 - Milieu agricole. Secteur du village de Saint-Charles. Image MSS de Landsat classifiée.(1977). Voir la légende à la page 59.

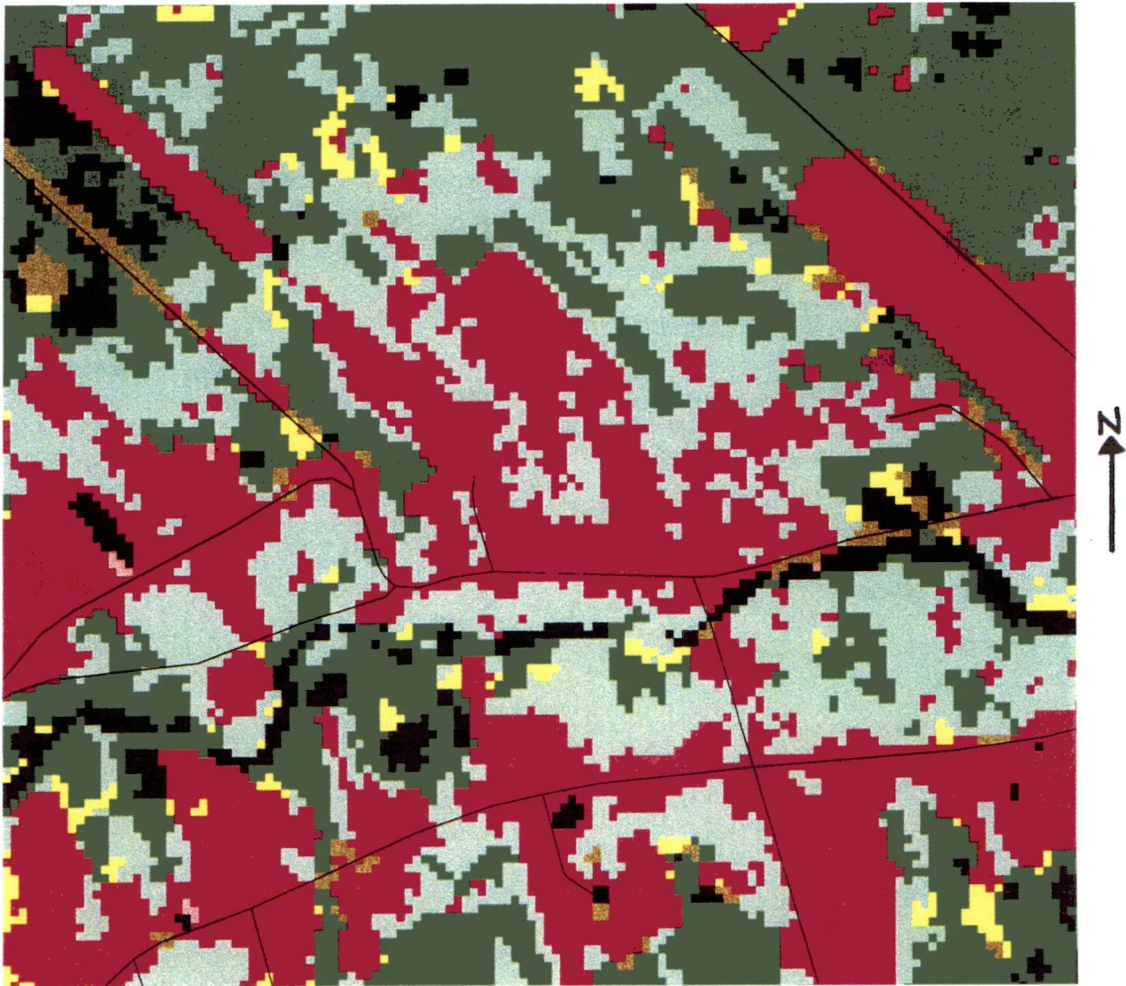


Figure 25 - Milieu agricole. Secteur du village de Saint-Charles. Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59.

Les figures 26, 27, 28 et 29 permettent d'analyser la classe **coupe forestière** (rouge). La photographie aérienne (figure 26), datant de 1973, nous montre clairement des zones des coupes assez récentes. L'image MSS (figure 27) nous propose, pour ces mêmes zones, la classe **régénération forestière** (vert clair) dans laquelle s'incrudent les classes **milieu humide** (brun jaune) et **coupe forestière/sol nu** (rouge). Le fait que les parcelles coupées en 1973 apparaissent en régénération en 1977 (image MSS) constitue une suite logique de la situation. Sur l'image MSS, le PPCC est de 87,1 % pour la classe **coupe forestière/sol nu**. Pour l'analyse de cette même classe sur l'image TM, nous avons dû utiliser une photographie aérienne de 1985 à une échelle de 1 : 40 000 (figure 28); la recherche de photographies aériennes plus récentes, sur lesquelles apparaissaient des coupes, s'étant avérée vaine. Les photographies aériennes récentes (e.g. : de 1991 et 1995) couvrent le PNK et quelques mètres au-delà de sa limite. Notons également qu'il est fort peu probable de retrouver de grandes zones de coupes dans le PNK. Au sud-ouest de la figure 28, nous observons deux zones de coupes. Sur l'image TM (figure 29), ces dernières se classent dans la **régénération forestière** et le **milieu agricole** (rose foncé). La géométrie de la plus grande coupe (sous la tourbière et le petit lac) apparaît assez fidèlement sur l'image TM. Comme pour l'image MSS, le fait que les parcelles coupées en 1985 apparaissent en régénération en 1993 (image TM) constitue une suite logique de la situation. Le PPCC sur l'image TM, pour la classe **coupe forestière/sol nu**, est de 93,6 %.



Figure 26 - Coupes forestières. Secteur Saint-Ignace Siding. Photo aérienne 73034 - 141. (1973). Échelle approximative : 1:10 000.

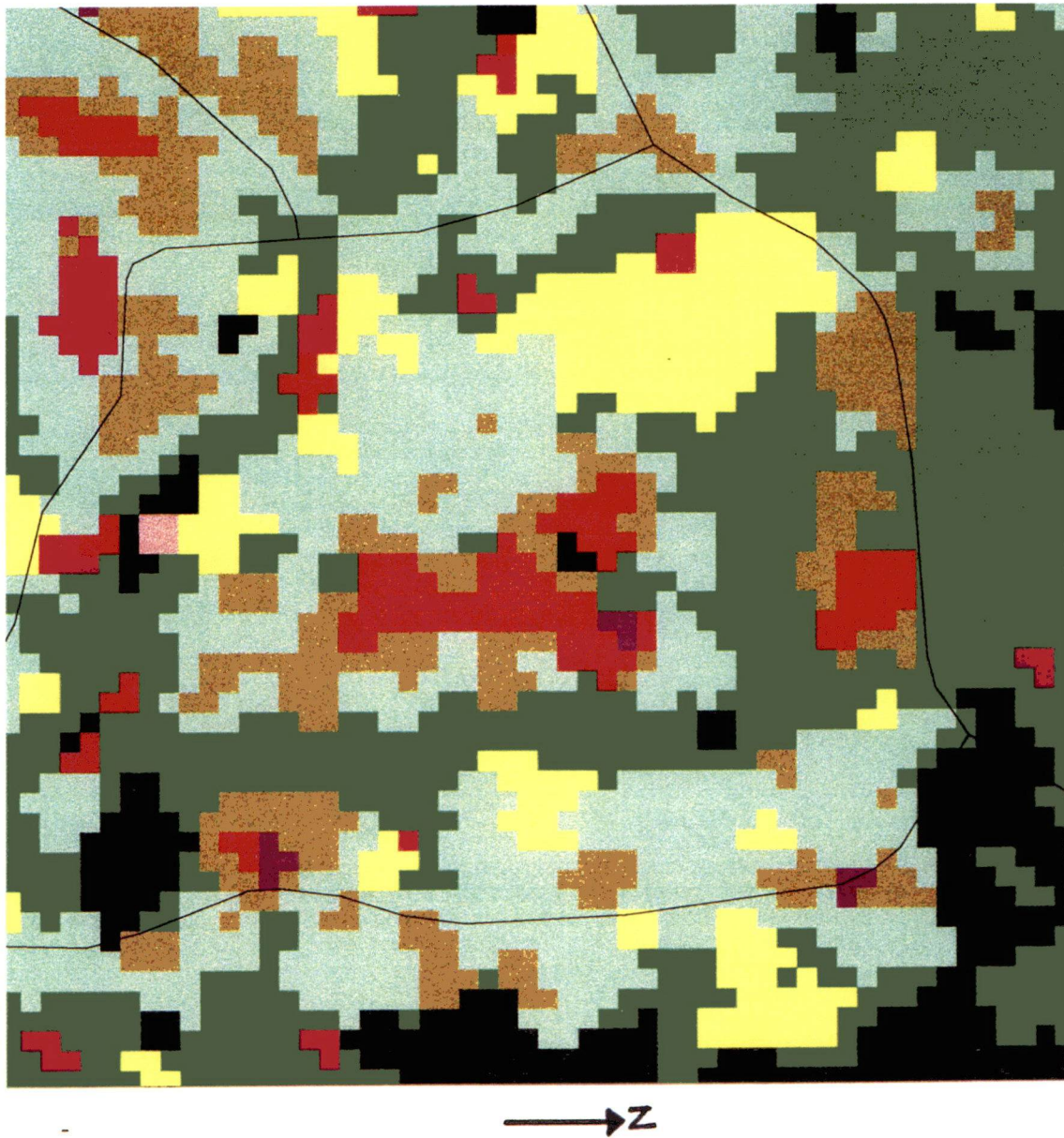


Figure 27 - Coupes forestières. Secteur Saint-Ignace Siding. Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59.

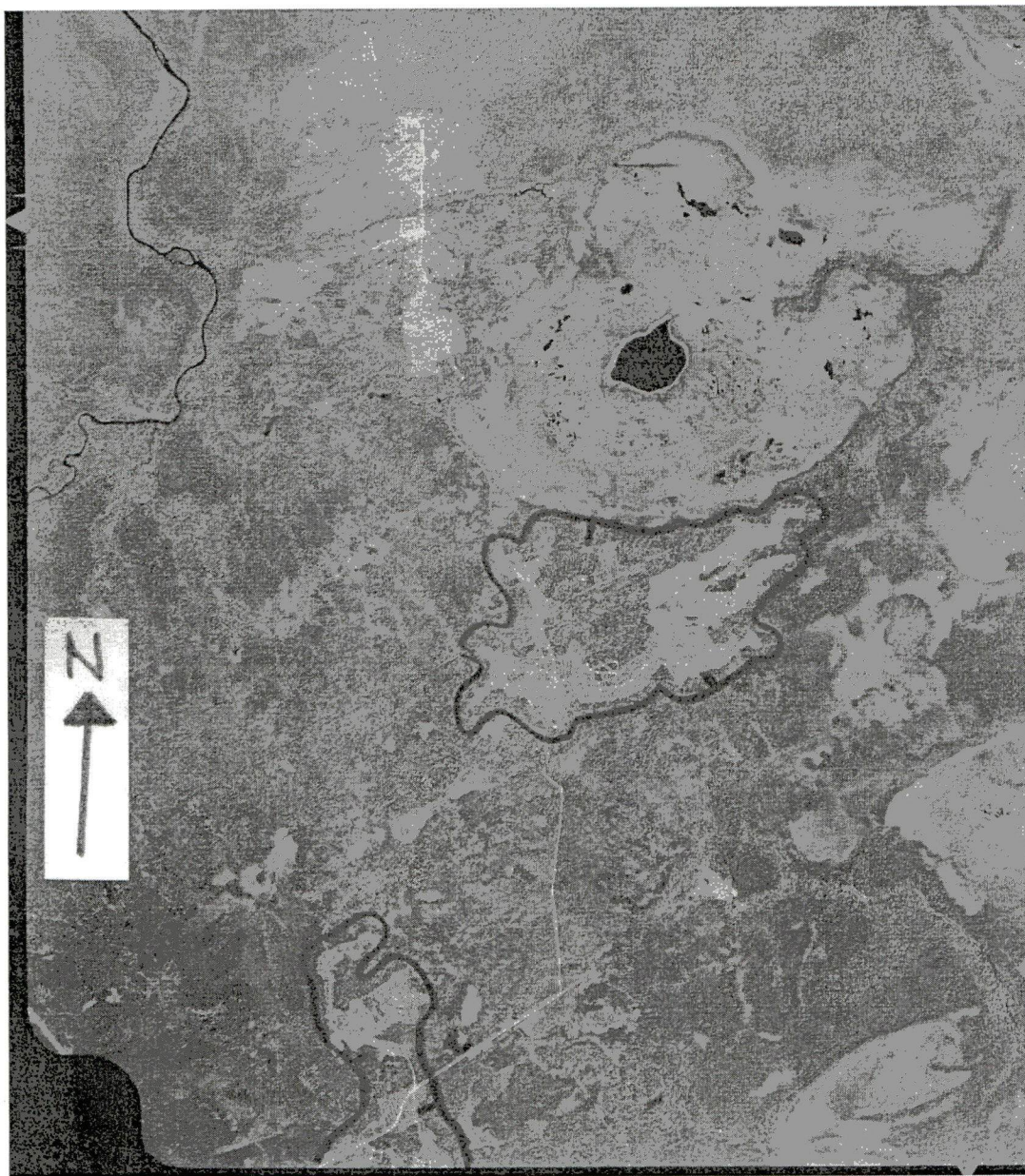


Figure 28 - Coupes forestières (au sud-ouest de la photographie). Secteur à mi-chemin entre St-Margarets et la limite ouest du PNK. Photo aérienne A26690-138. (1985). Échelle approximative: 1 : 40 000.

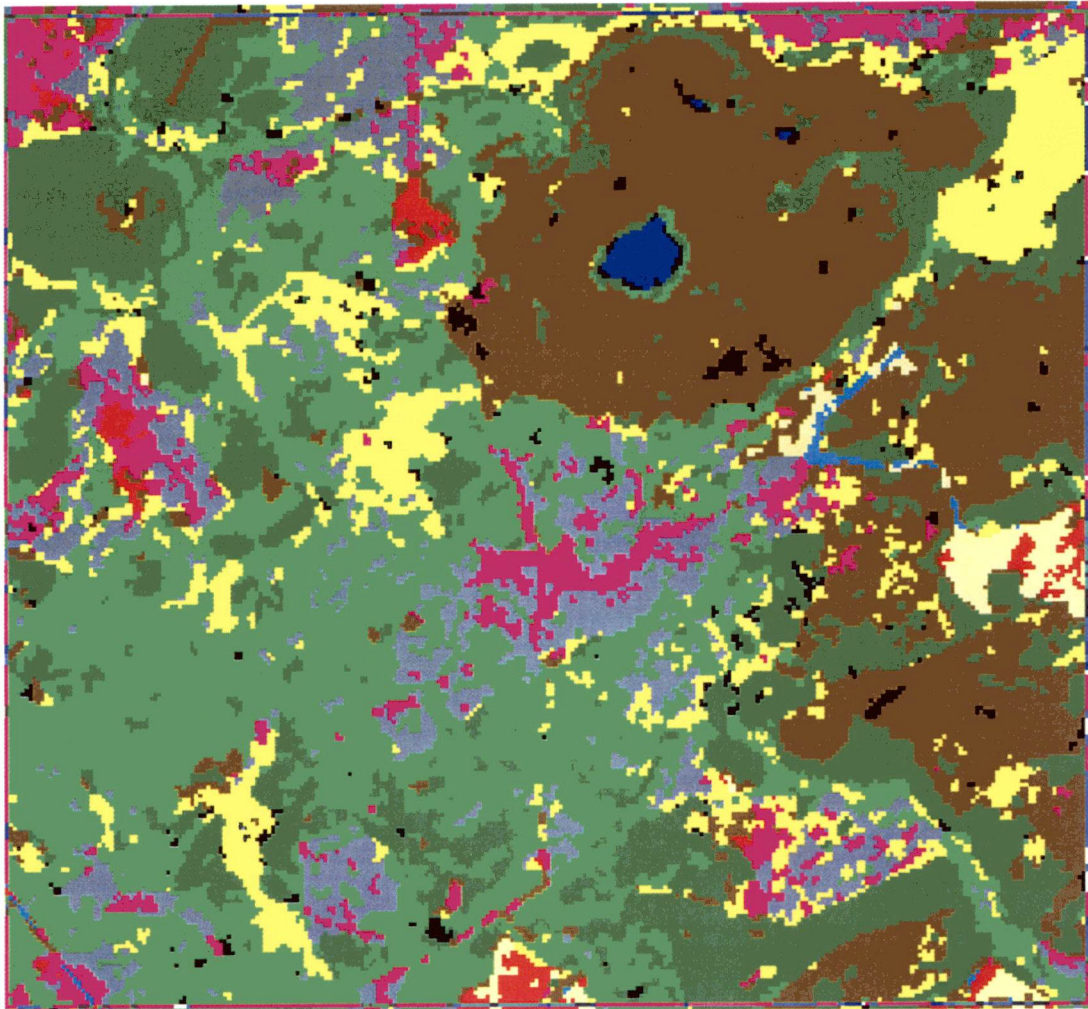


Figure 29 - Coupes forestières. Secteur à mi-chemin entre St-Margarets et la limite ouest du PNK. Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59. Le nord correspond à la partie supérieure de la figure. (Note : la figure ci-dessus a été obtenue par un processus différent des autres figures. Les secteurs en régénération devraient apparaître en vert clair plutôt qu'en gris. Les autres couleurs peuvent aussi apparaître différemment des autres croquis.)

Les figures 30, 31, 32 et 33 présentent la classe **sol nu** (rouge). En comparant la photographie aérienne de 1973 (figure 30) à l'image MSS (figure 31), on constate que la géométrie des surfaces où le sol est nu (au croisement des deux axes linéaires) n'est pas très bien définie sur l'image MSS. Néanmoins, le rouge (sol nu) et le rose foncé (milieu agricole) dominant. Sur l'image MSS, le PPCC est de 87,1 % pour la classe **coupe forestière/sol nu**. Pour l'analyse de cette même classe sur l'image TM (figure 33), nous avons dû utiliser une photographie aérienne de 1985 à une échelle de 1:40 000 (figure 32). Sur la photographie aérienne, nous observons que la tourbière exploitée (Shaw, 1986), où le sol est nu, est bien délimitée sur l'image TM et est composée presque exclusivement de pixels rouges. Le PPCC sur l'image TM, pour la classe **coupe forestière/sol nu**, est de 93,6 %.

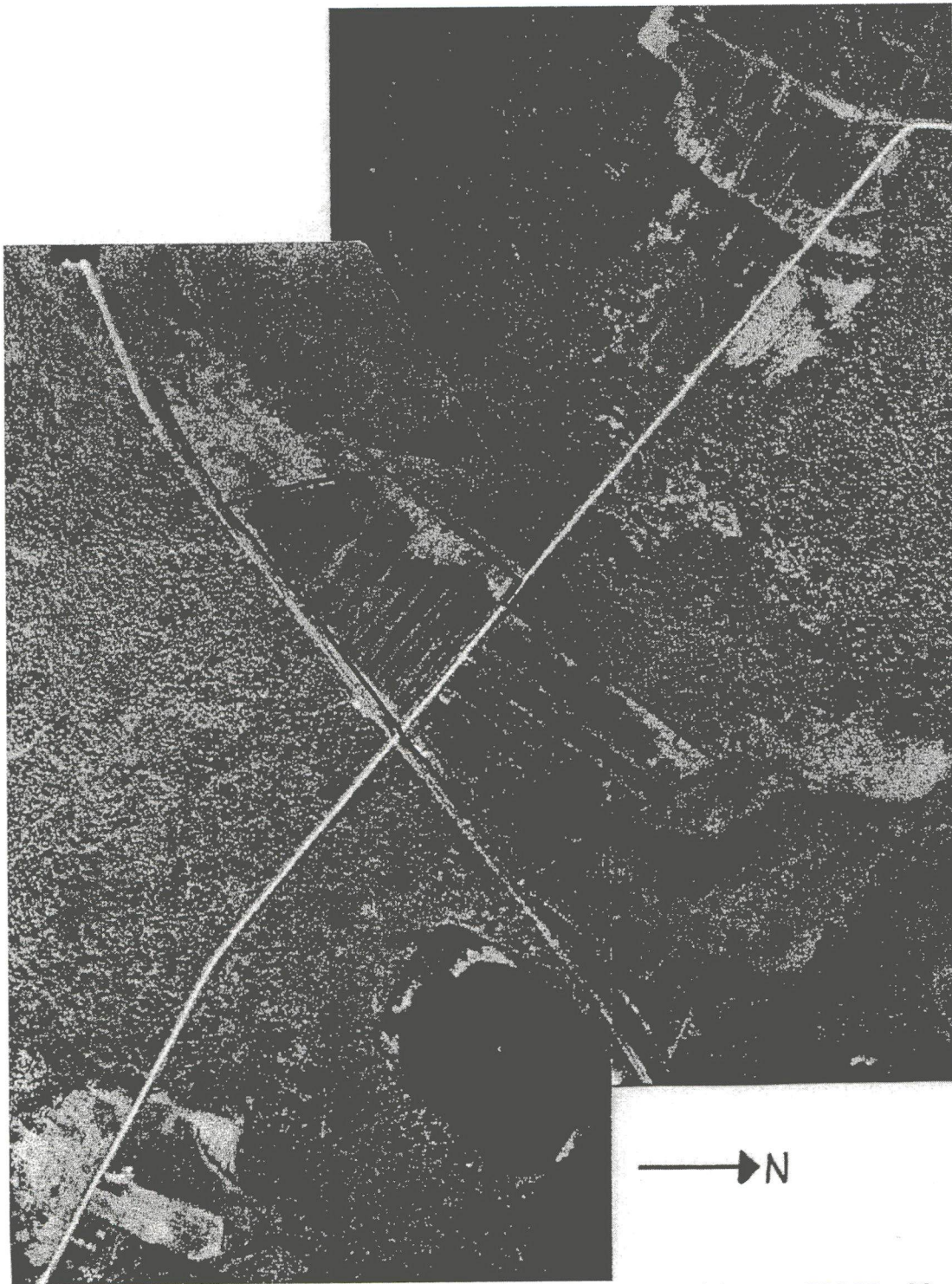


Figure 30 - Sol nu. Secteur Saint-Charles Station. Photos aériennes 73037 - 39 et 73037 - 100 . (1973). Échelle approximative : 1:10 000.

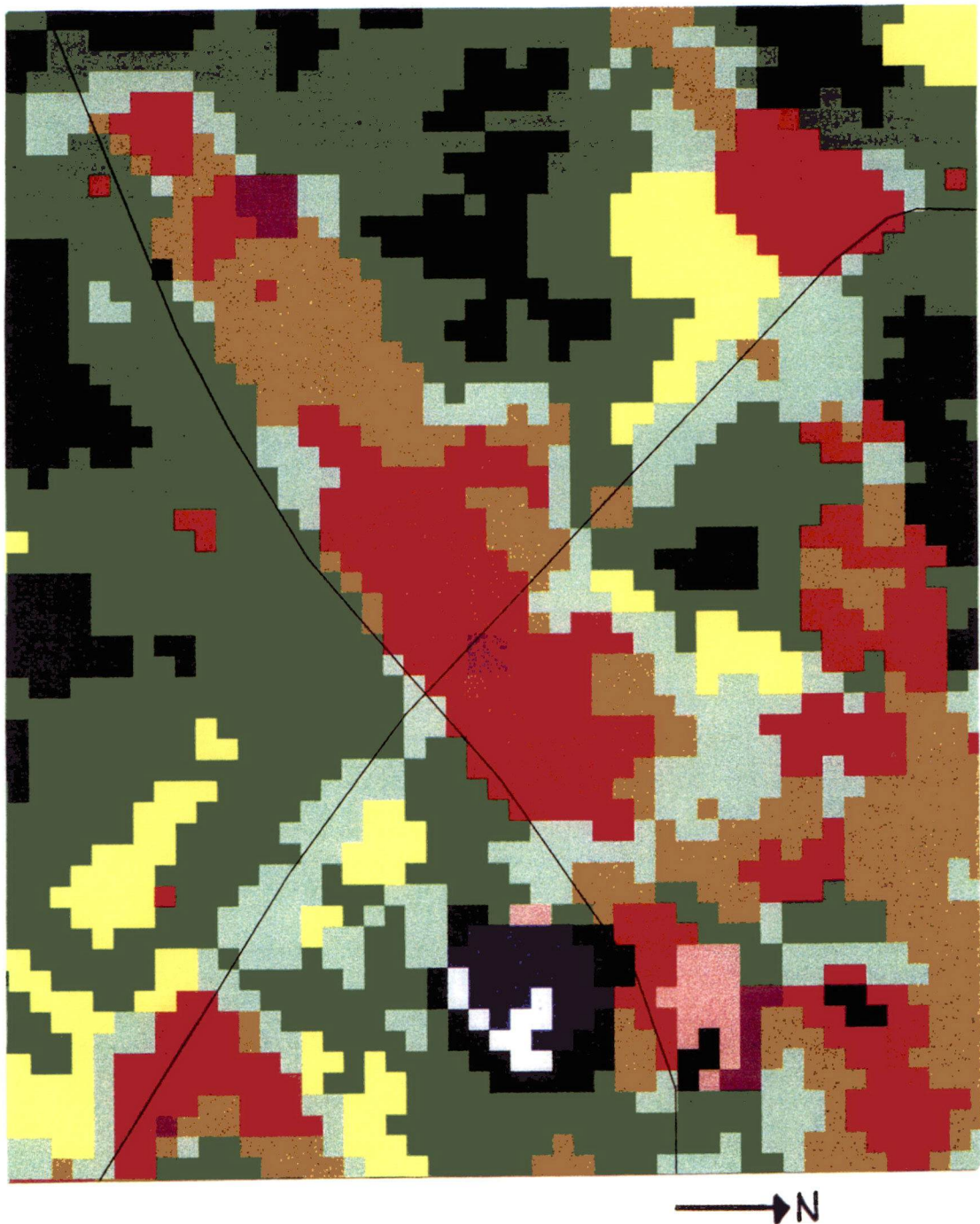


Figure 31 - Sol nu. Secteur Saint-Charles Station. Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59.

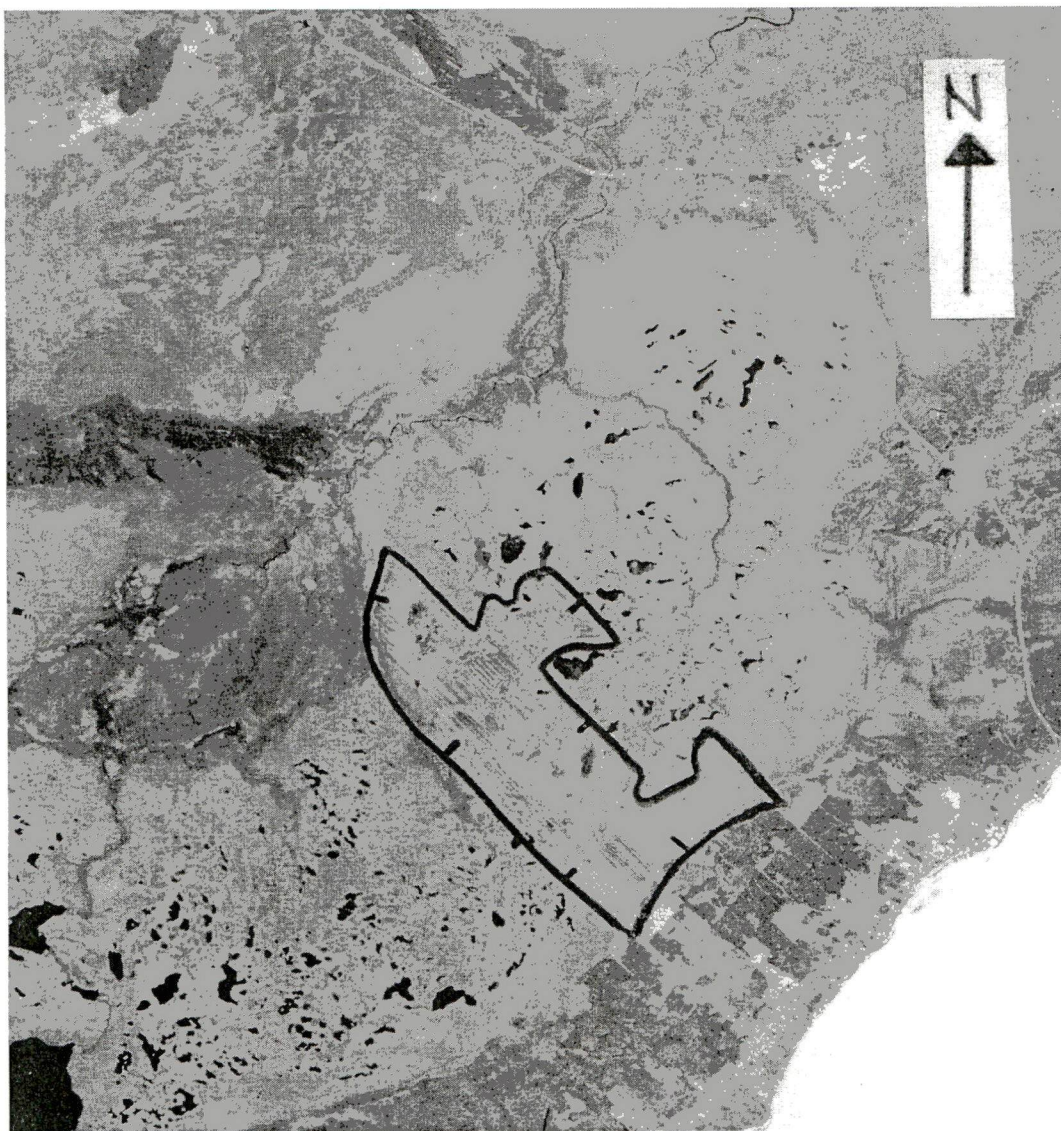


Figure 32 - Sol nu. Secteur de Pointe-Sapin. Photo aérienne A26690 - 210. (1985).
Échelle approximative: 1 : 40 000.

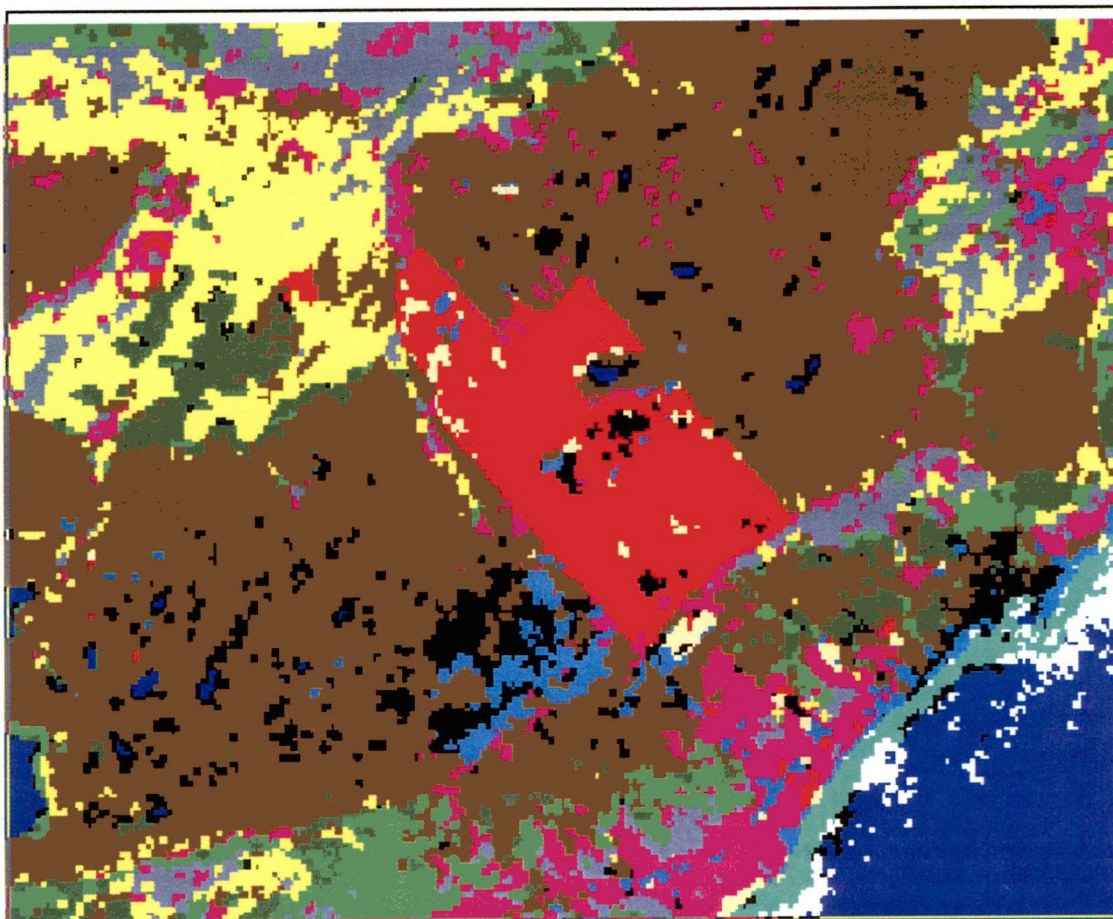


Figure 33 - Sol nu. Secteur Pointe-Sapin. Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59. Le nord correspond à la partie supérieure de la figure. (Note : la figure ci-dessus a été obtenue par un processus différent des autres figures. Les secteurs en régénération devraient apparaître en vert clair plutôt qu'en gris et le milieu humide en brun-jaune plutôt qu'en brun. Les autres couleurs peuvent aussi apparaître différemment des autres croquis.)

Les figures 34, 35 et 36 exposent un échantillon des résultats obtenus pour la classe **milieu humide**. Sur les images MSS (figure 35) et TM (figure 36), la géométrie de la tourbière représente fidèlement la réalité (figure 34). La classe **milieu humide** (brun-jaune) domine largement dans les deux cas. Cependant, sur l'image MSS, la bordure de la tourbière, et quelques zones dans celle-ci, sont considérées comme faisant partie de la classe **régénération forestière** (vert clair). Sur l'image TM, la limite de la tourbière est beaucoup plus nette et la classe **régénération forestière**, presque absente. Le PPCC est de 92,1 % pour l'image MSS et de 76,6 % pour l'image TM.

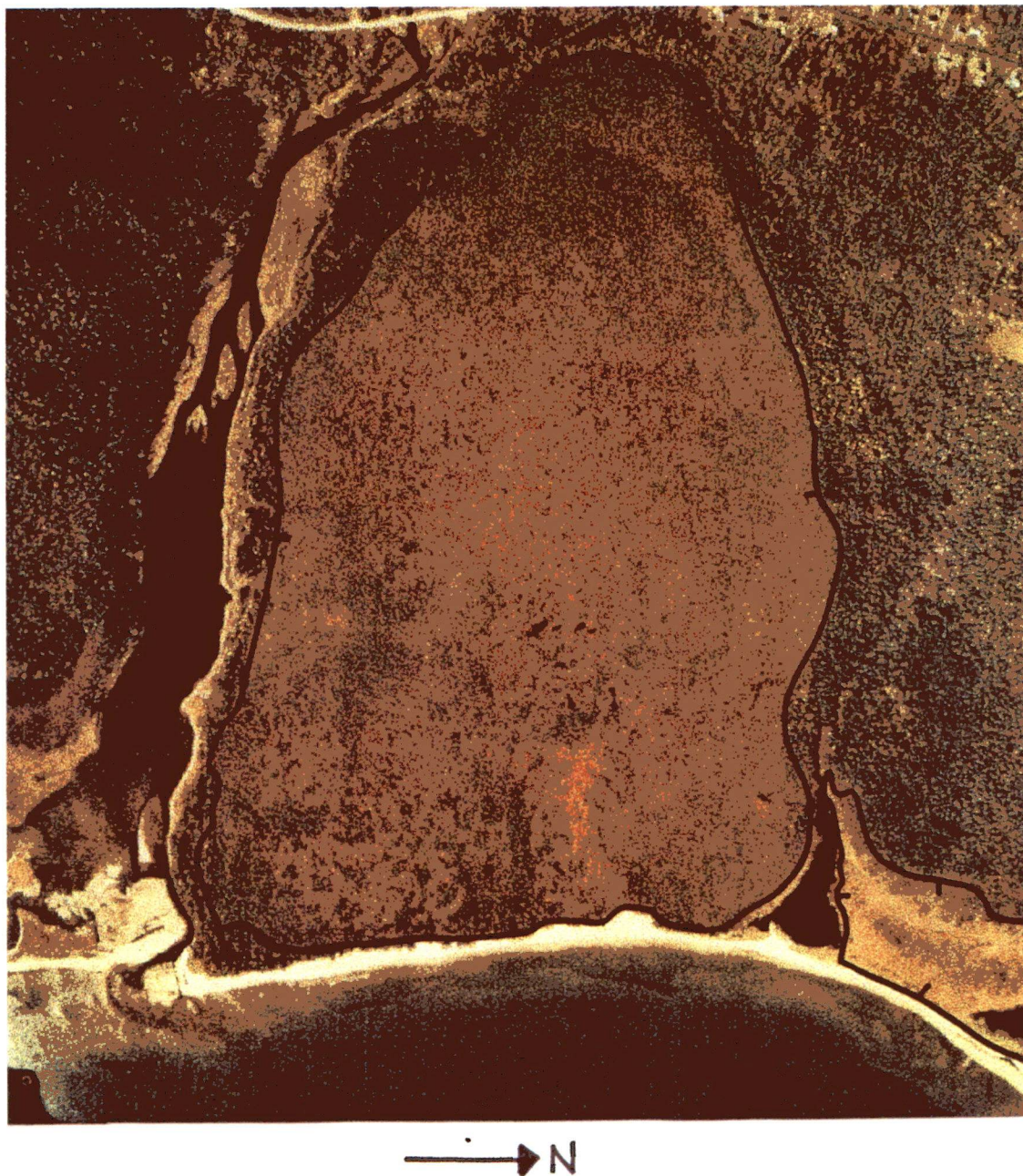


Figure 34 - Milieu humide. Secteur Rivière-au-Portage. Photo aérienne A31729 - 8. (1995). Échelle approximative : 1:10 000.

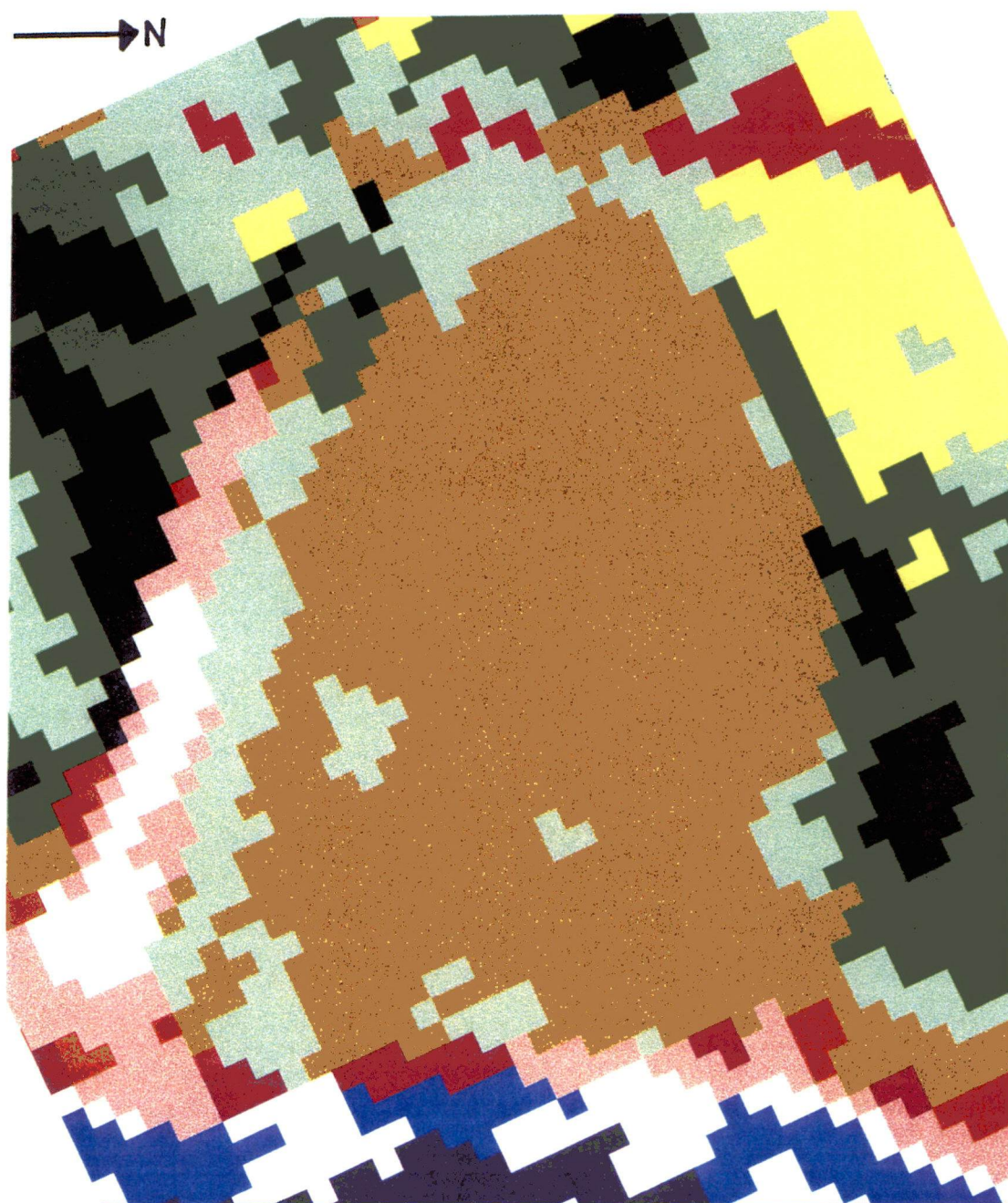


Figure 35 - Milieu humide. Secteur Rivière-au-Portage. Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59.

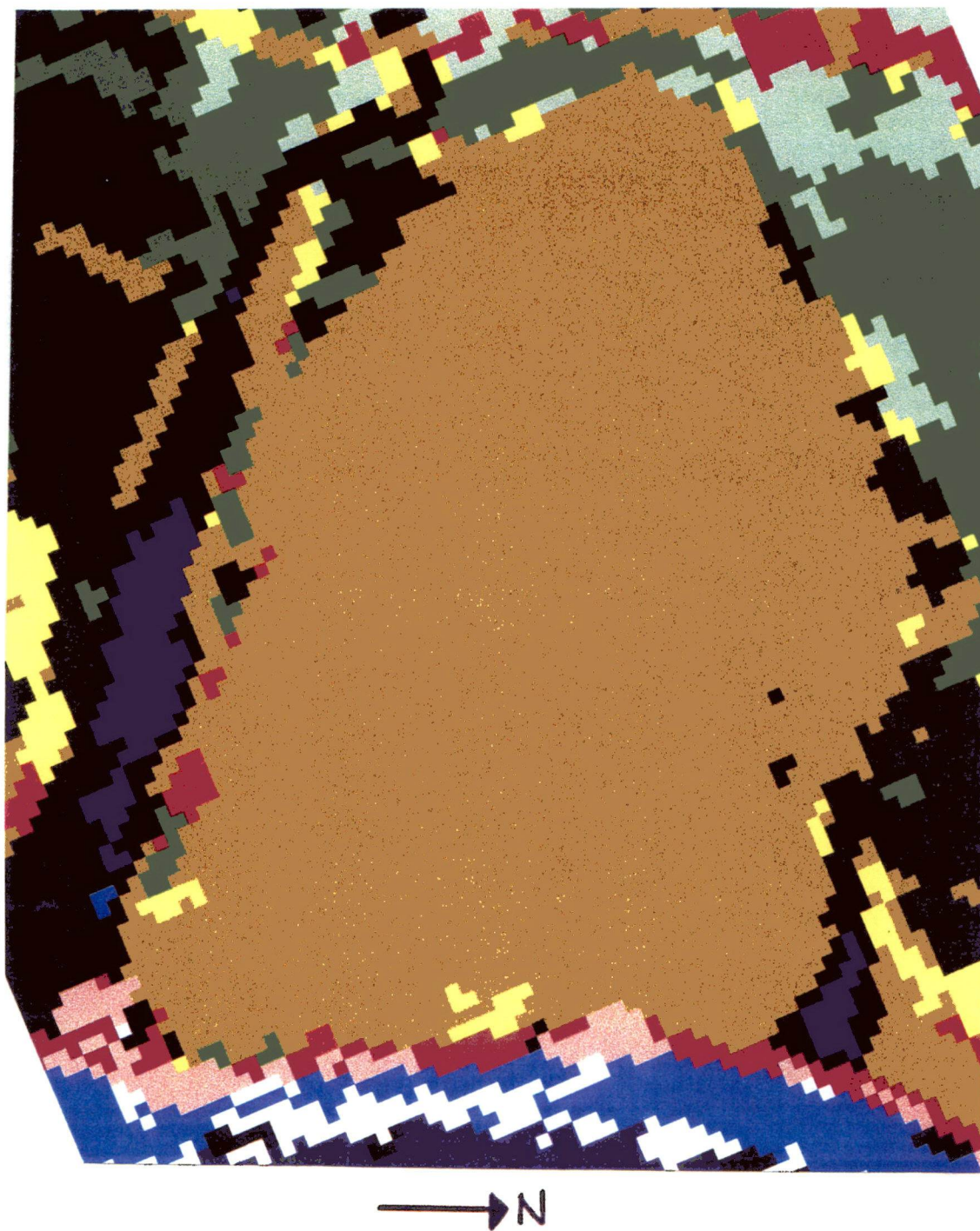


Figure 36 - Milieu humide. Secteur Rivière-au-Portage. Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59.

Les figures 37, 38 et 39 nous permettent de visualiser les classes **dunes/plages** (rose) et **hauts-fonds** (turquoise). L'aspect général de la dune, par rapport à la photographie aérienne (figure 37), est mieux conservé sur l'image TM (figure 39) que sur l'image MSS (figure 38). Sur cette dernière, la classe **milieu urbanisé/sols nus** (mauve) apparaît sur de petites surfaces à travers la classe **dunes/plages** (rose). Il faut noter qu'une végétation clairsemée est présente sur la crête de la dune. Plusieurs pixels non-classifiés apparaissent en blanc entre l'eau (bleu foncé) et la plage (rose), particulièrement sur l'image MSS. Notons que le PPCC, pour la classe dunes/plages, est de 70,7 % sur l'image MSS et de 81,8 % sur l'image TM. Sur cette dernière, la classe **coupes forestières/sols nus** (rouge) est observable sous la forme d'une mince bande discontinue sur la partie de la dune où l'on retrouve un peu de végétation. Cette classe est complètement absente sur l'image MSS. Quant aux **hauts-fonds**, ils sont mieux définis sur l'image TM que sur l'image MSS et présentent une géométrie différente. De plus, les chenaux entre les hauts-fonds sont plus facilement observables sur l'image TM. La forme des hauts-fonds, et par conséquent celle des chenaux, est susceptible d'être modifiée par de fortes marées ou de forts courants. Pour les hauts-fonds, le PPCC est de 74,4 % sur l'image MSS et de 94,6 % sur l'image TM.

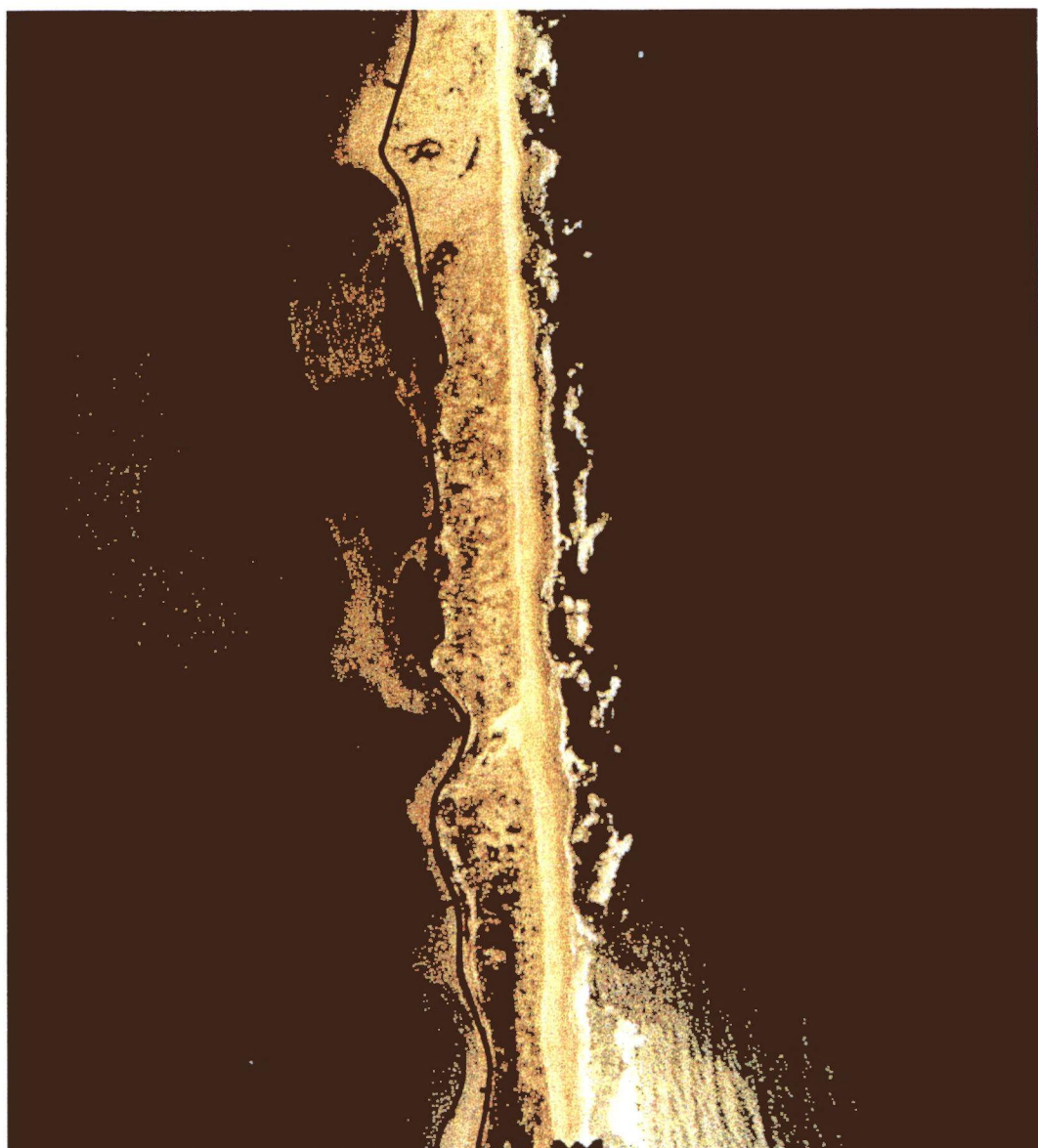


Figure 37 - Dunes, plages et hauts-fonds. Secteur Baie de St-Louis (Dune Richibucto Nord). Photo aérienne A31596 - 88. (1991).
Échelle approximative : 1:10 000.

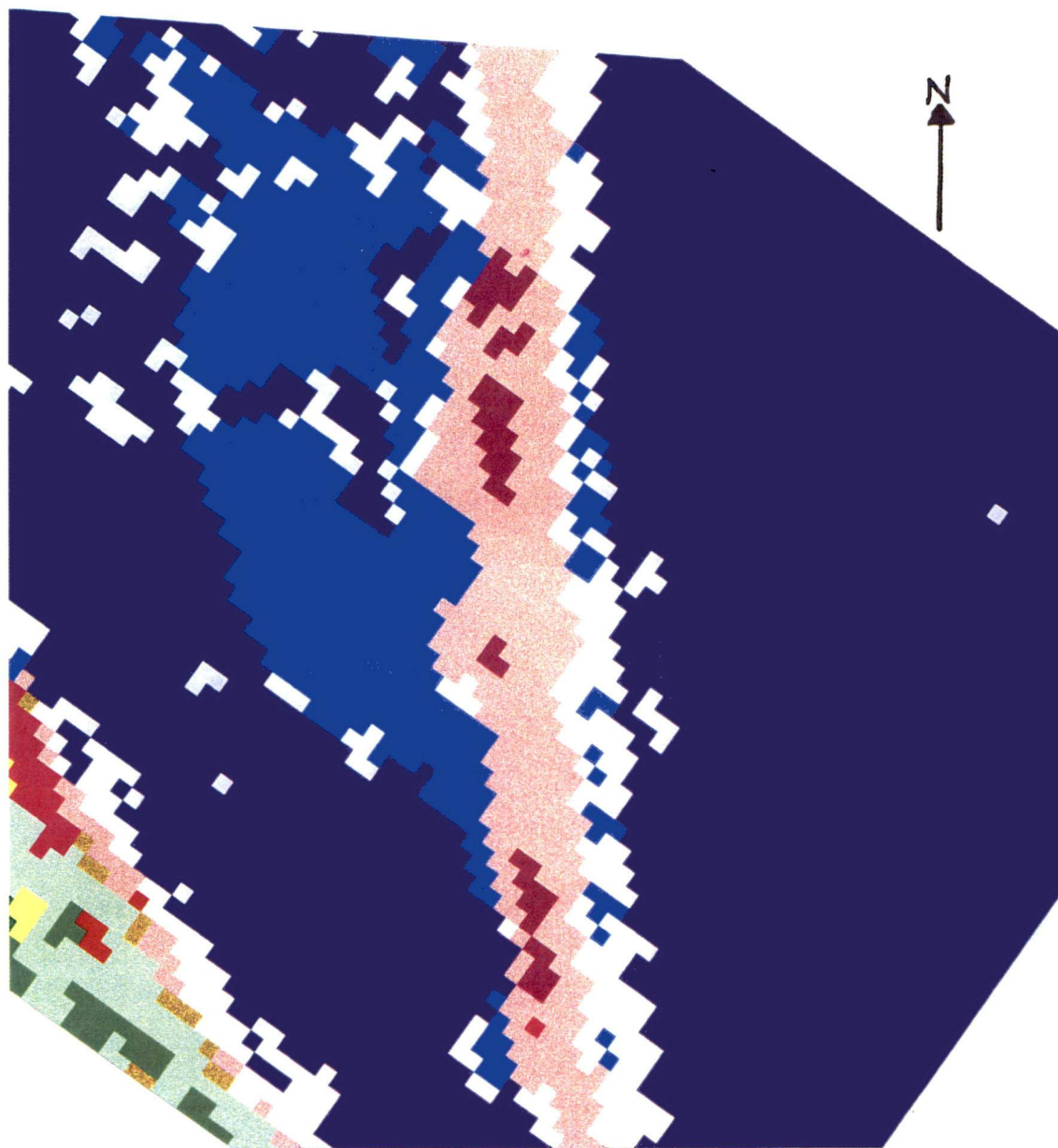


Figure 38 - Dunes, plages et hauts-fonds. Secteur Baie de St-Louis (Dune Richibucto Nord). Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59.

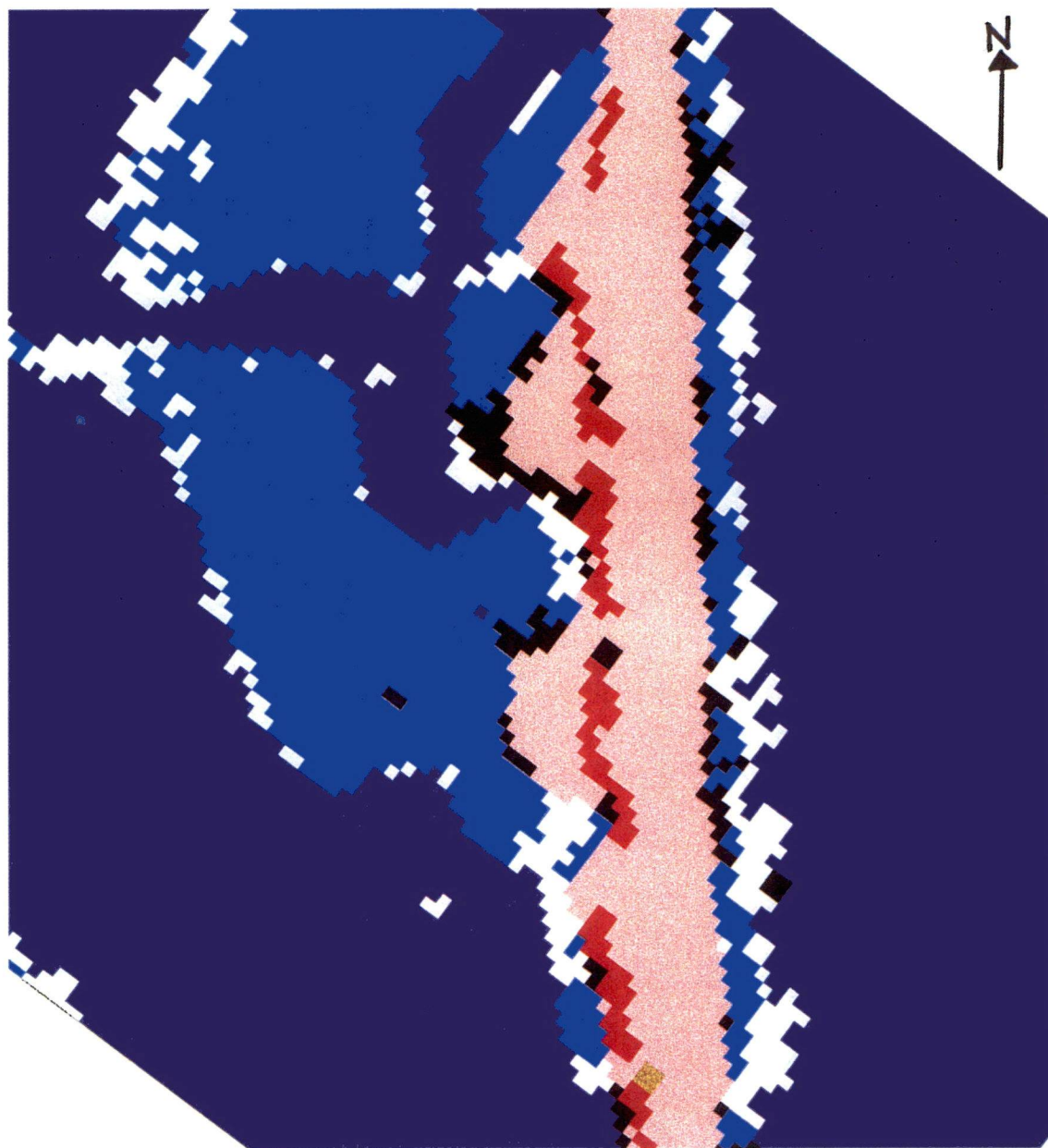


Figure 39 - Dunes, plages et hauts-fonds. Secteur Baie de St-Louis (Dune Richibucto Nord). Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59.

Les figures 40, 41, 42 et 43 présentent la classe **milieu urbanisé et sols nus** (mauve). Les axes routiers (mauve) plus larges ressortent un peu mieux sur l'image TM (figure 43) mais demeurent difficiles à identifier sans l'aide de la photographie aérienne (figure 42) ou du réseau routier vectoriel superposé à l'image. Sur l'image MSS (figure 41), de multiples classes semblent se côtoyer de façon désordonnée et sans géométrie précise. Même en superposant le réseau routier vectoriel, on distingue peu de regroupements ou d'alignements de pixels de la classe analysée ici. Toutefois, sur les deux images, le rouge (coupes forestières/sols nus), le mauve (milieu urbanisé/sols nus) et le rose foncé (milieu agricole) dominent à proximité des axes de communication. Ce milieu morcelé montre que l'apport de l'image MSS en milieu urbain est extrêmement limité, voire inutile, surtout si l'on considère que le PPCC n'est que de 42,4 % sur l'image MSS et de 52,0 % sur l'image TM. L'image TM permet une distinction légèrement accrue des différents milieux mais sa classification demeure confuse lorsque le morcellement s'accroît. En comparant les photographies aériennes de 1974 (figure 40) et de 1991 (figure 42), on constate que les bâtiments et les corridors de communication sont effectivement plus nombreux en 1991.



Figure 40 - Milieu urbanisé et sols nus. Village de Grande-Aldouane. Photos aériennes A30953 - 37 et A30954 - 123. (1974). Échelle approximative : 1:10 000.

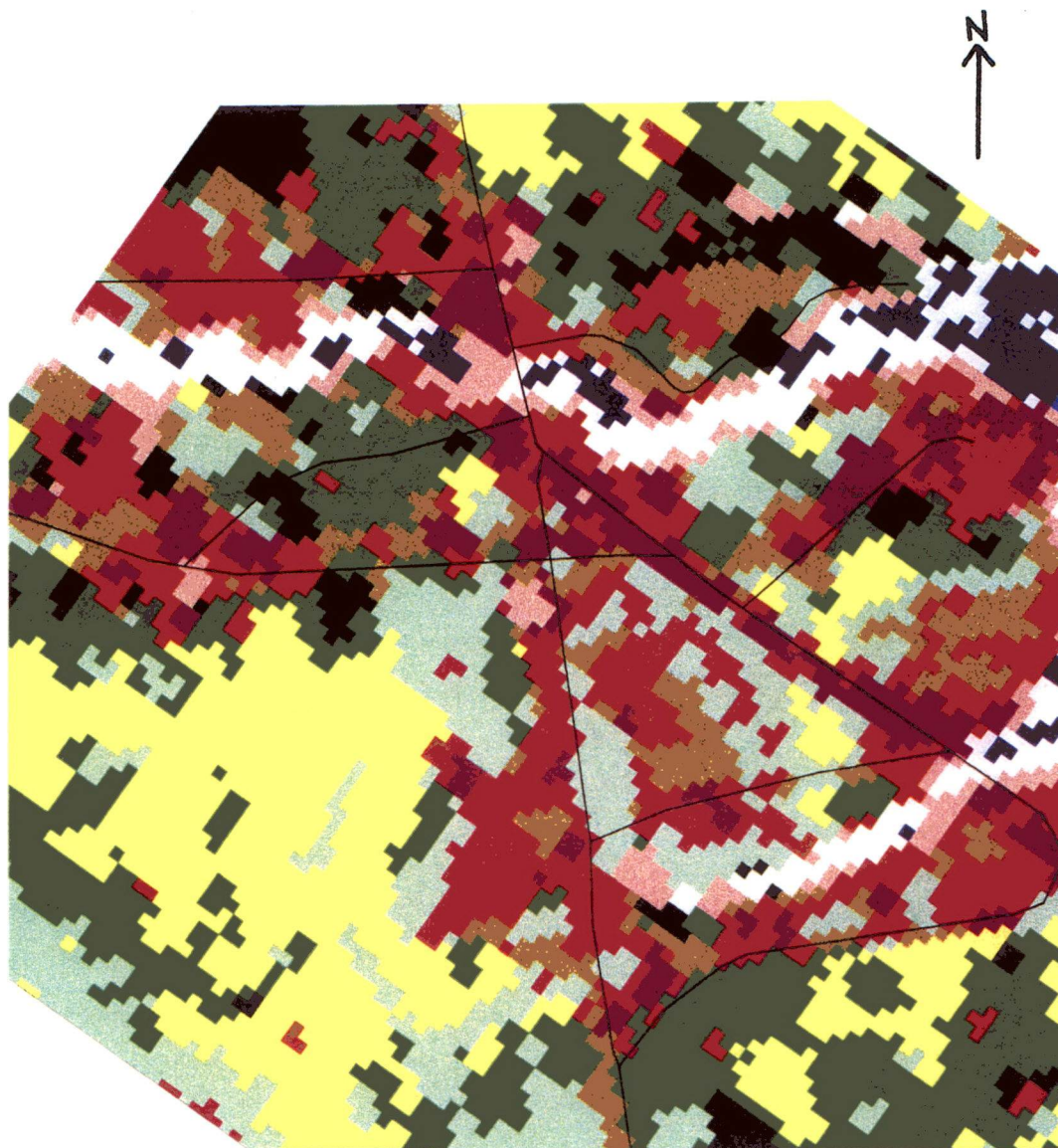


Figure 41 - Milieu urbanisé et sols nus. Village de Grande-Aldouane. Image MSS de Landsat classifiée (1977). Voir la légende à la page 59.

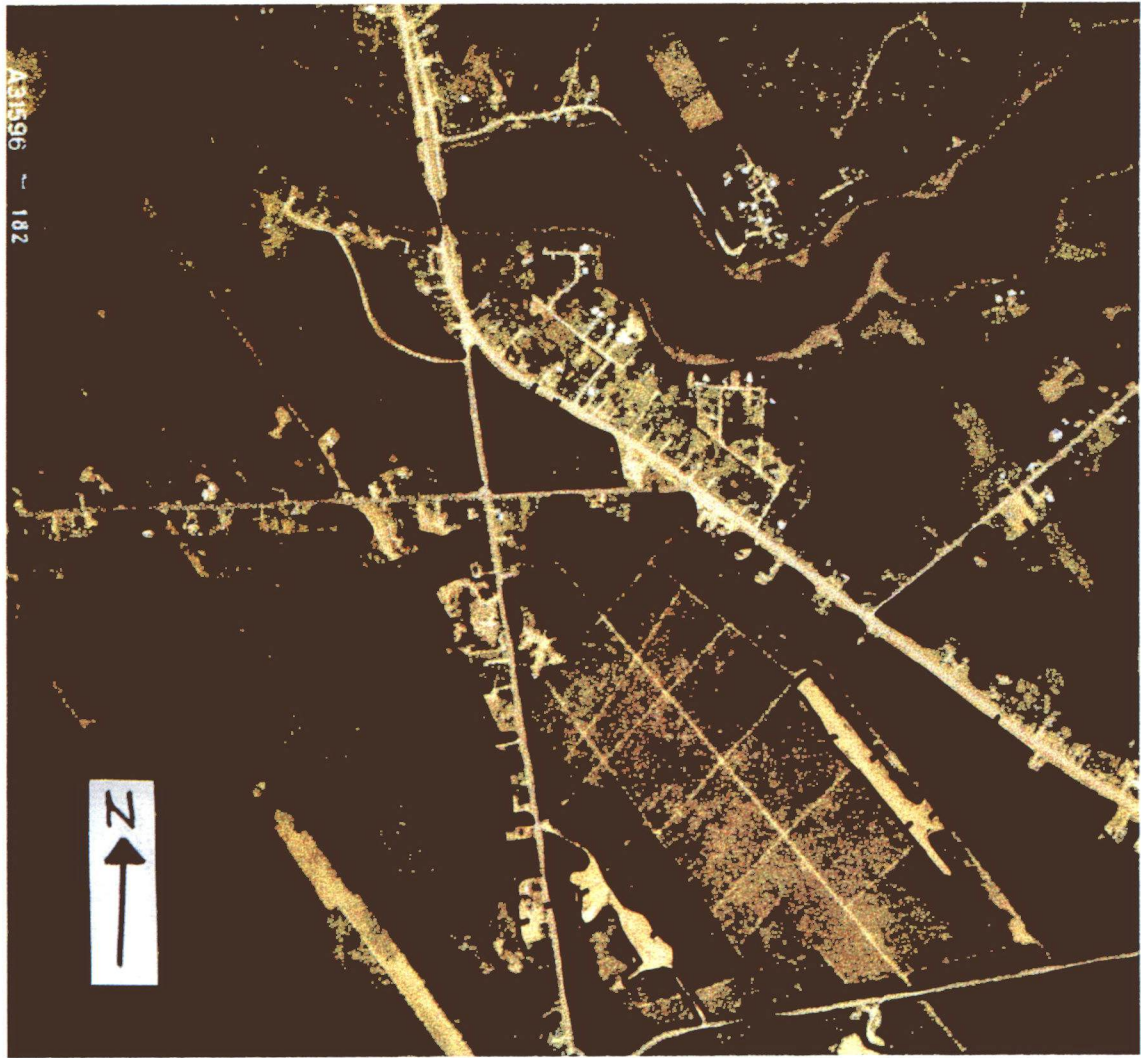


Figure 42 - Milieu urbanisé et sols nus. Village de Grande-Aldouane. Photo aérienne A31596 - 182. (2 septembre 1991). Échelle approximative : 1:10 000.

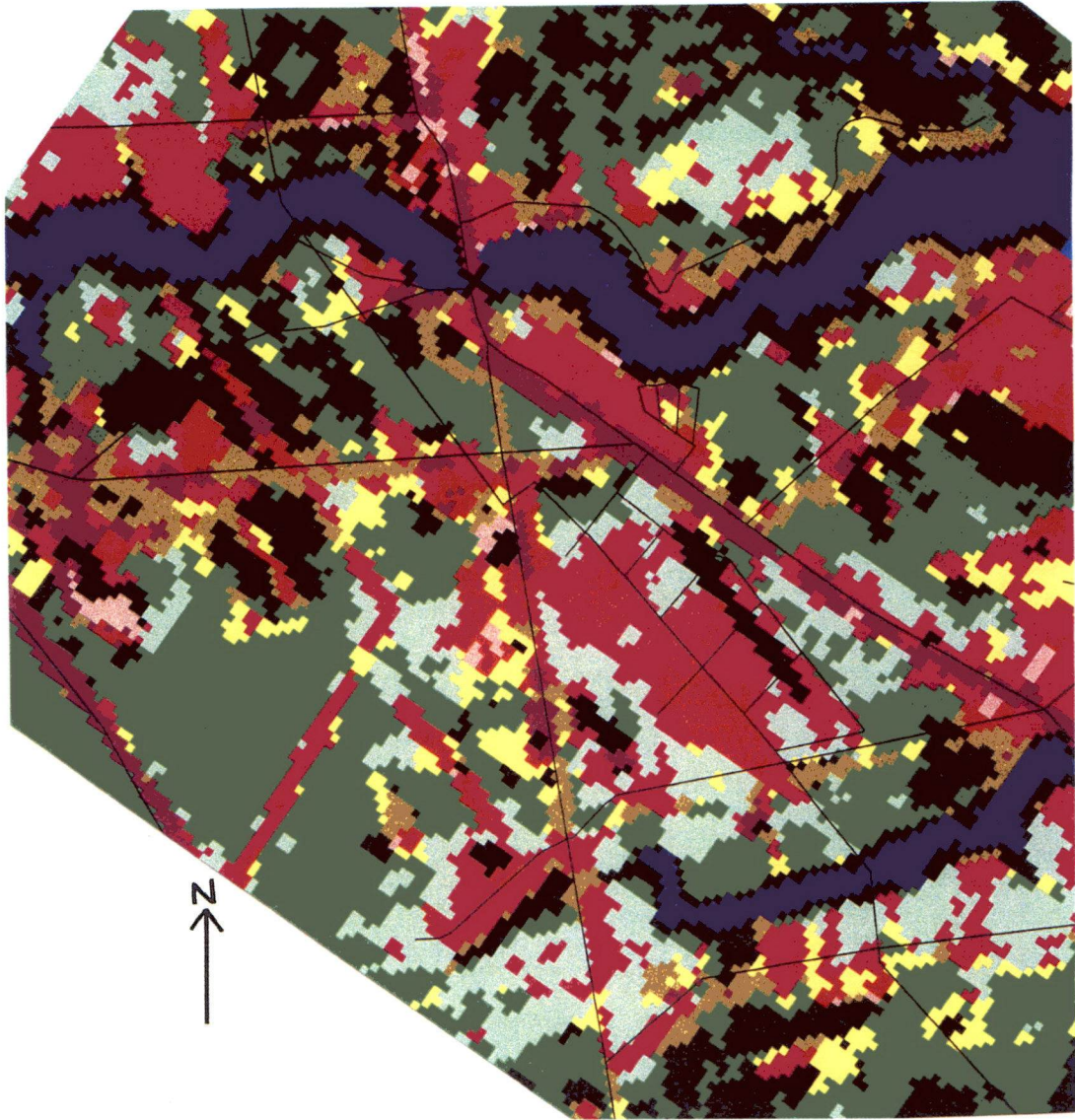


Figure 43 - Milieu urbanisé et sols nus. Village de Grande-Aldouane. Image TM de Landsat classifiée (1993). Voir la légende à la page 59.

La classe **eau** (bleu foncé) est présente sur plusieurs figures analysées précédemment. Généralement, cette classe est plus facile à distinguer sur l'image TM, particulièrement dans les secteurs où les cours d'eau sont étroits. Les figures 35, 36, 38, 39, 41 et 43 témoignent de ce phénomène. On y observe que les cours d'eau (figures 41 et 43) ou les chenaux (figures 38 et 39) sont discernables sur les figures provenant de l'image TM tandis qu'ils sont presque absents sur celles provenant de l'image MSS. La classe **eau**, tout comme les classes **milieu humide** et **dunes/plages**, n'a probablement subi aucun changement significatif de 1977 à 1993. Le PPCC, pour la classe **eau**, est de 99,1 % sur l'image MSS et de 99,9 % sur l'image TM. Si les **dunes/plages** ont changé de superficie, l'échelle à laquelle nous avons réalisé l'étude ne nous permet pas d'en déceler les changements.

5.2. Analyse de la répartition des types d'utilisations du sol par imagerie satellitaire

L'annexe 4 comprend une carte indiquant l'emplacement et la nature des changements d'occupation du sol (de 1977 à 1993). La carte, produite à l'aide de la commande *Combine* du SIG (ArcInfo 8), présente cent quarante-deux (142) classes différentes. Comme il serait difficile pour l'œil humain de distinguer une telle quantité de couleurs sur une carte, nous ne présentons que trente-neuf (39) classes. Ce sont les trente-neuf classes les plus facilement localisables sur la carte. Les trente-huit (38) premières classes sont présentées en ordre décroissant de superficie couverte sur la carte. Nous obtiendrions cent soixante-huit (168) classes différentes si l'on ne regroupait pas les trois classes forestières (forêts résineuse, feuillue et mixte) en une seule classe avant l'utilisation de la commande *Combine* dans le SIG. Dans le prochain paragraphe, nous analyserons les dix plus importantes classes présentes sur la carte de l'annexe 4. Elles sont présentées en ordre décroissant de superficie occupée.

La carte de l'annexe 4 est dominée par le milieu forestier (classe **forêt à forêt**) (en vert foncé). Comme nous avons regroupé les classes forestières pour faciliter la consultation de la carte, nous ne distinguons aucun changement d'un type forestier à un autre, mais ils sont évidemment présents. La classe **eau à eau** (en bleu) est la seconde classe dominante en superficie occupée. Le changement de type **régénération forestière à forêt** (en mauve) est la troisième classe en superficie occupée. Elle est particulièrement distinguable près de la partie centrale de la carte ainsi qu'au nord-ouest et sud-ouest de celle-ci. La classe **forêt à régénération forestière** (en vert clair) est quatrième quant à la superficie occupée. Cette classe est répartie de façon plutôt uniforme sur l'ensemble du territoire sauf à l'intérieur des limites du PNK où elle semble presque inexistante. Cette situation n'a rien d'étonnant puisque la forêt n'est pas exploitée dans le PNK. La classe **milieu humide à milieu humide** (brun clair) vient en cinquième position. La classe **milieu agricole à forêt** (en

jaune) occupe le sixième rang pour la superficie occupée. Elle est répartie de façon assez homogène dans la zone d'étude mais presque absente à l'intérieur du PNK. Il est surprenant que cette classe soit si peu présente dans le PNK surtout si l'on considère qu'il n'y a plus d'exploitation agricole dans le PNK. La flore arborescente devrait avoir progressivement envahi les champs jadis cultivés. Les classes **milieu agricole à milieu agricole** (en rose foncé) et **nuages à eau** (en gris) occupent respectivement les septième et huitième rangs pour l'importance de leur superficie. Au neuvième rang, la classe **forêt à milieu agricole** (en orange) est surtout observable dans les parties sud-est et sud-ouest de la carte. Les zones orangées sont cependant plus nombreuses et plus grandes dans la partie sud-ouest. Dans ce secteur, nous avons observé que l'exploitation forestière était particulièrement vigoureuse et, par conséquent, les traces de coupes très récentes étaient facilement distinguables. Les zones identifiées comme étant des zones agricoles sur l'image TM doivent donc être examinées avec discernement car il peut aussi s'agir de coupes forestières très récentes. La dixième classe la plus importante en superficie est la classe **forêt à milieu humide** (en mauve clair). On l'observe principalement autour (i.e. en bordure) des tourbières. Comme il est peu probable que la superficie des tourbières ait varié significativement de 1977 à 1993, le changement observé peut être attribuable aux satellites Landsat MSS et TM qui ont captés la limite entre le milieu humide et la forêt avec un niveau de détail différent. La résolution spatiale des deux images-satellite utilisées était, en effet, différente.

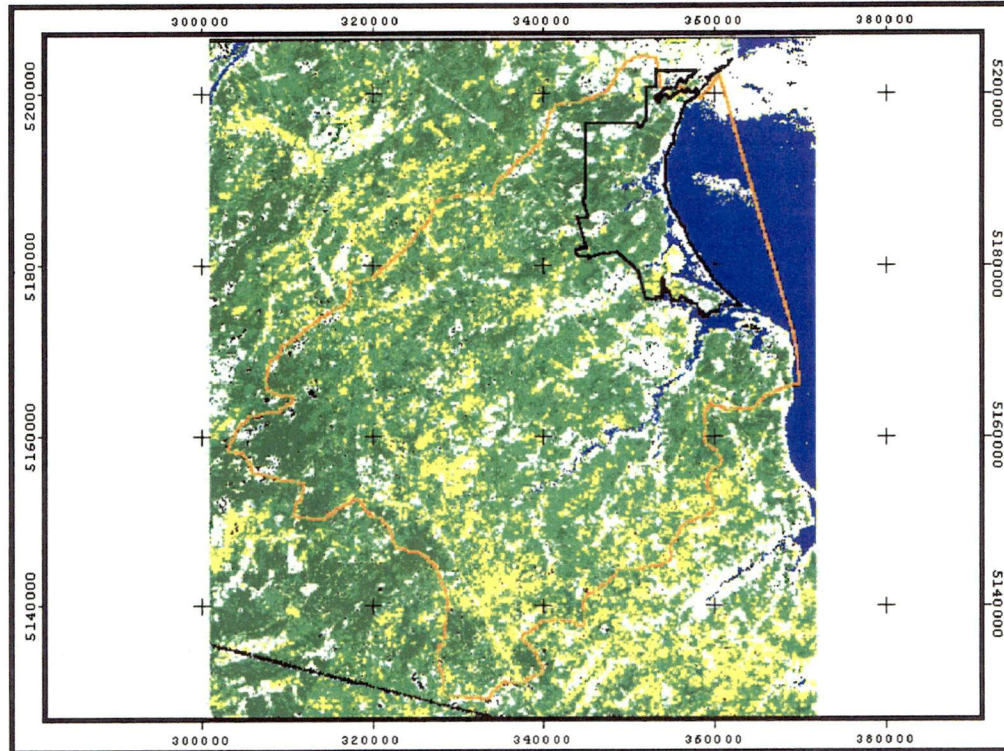
Sur les figures 44 et suivantes, nous avons désactivé (i.e. mis en blanc) certaines classes afin de mieux en distinguer d'autres et, ainsi, commenter leur répartition en 1977 et 1993.

Les figures 44 et 45 comparent la répartition des classes **forêt résineuse**, **forêt feuillue** et **forêt mixte** en 1977 et 1993. Sur les deux images, la forêt résineuse est surtout présente dans la partie ouest. La forêt mixte semble être plus répandue en 1993 qu'en 1977. La meilleure résolution spatiale de l'image TM par rapport à celle de

l'image MSS doit être considérée. Quant à la forêt feuillue, elle est beaucoup plus évidente en 1977 qu'en 1993. Deux options sont donc possibles : la forêt feuillue de 1977 s'est transformée en une forêt un peu plus "mixte" au fil des ans ou les sites d'entraînement utilisés pour la classification étaient quelque peu erronés.

Occupation du sol (1977)

Forêt résineuse, forêt feuillue et forêt mixte



Légende

- Limite du Parc National Kouchibouguac
- Limite des bassins versants du PNK
- Forêt résineuse
- Forêt feuillue
- Forêt mixte
- Eau
- Non-classés



10 0 10 km

Image MSS de Landsat-2 (13 août 1977)
Projection UTM
Système de référence géodésique nord-américain 1983

Denis Groux
Université de Sherbrooke
Juillet 2000

Figure 44 - Occupation du sol en 1977 (forêt résineuse, forêt feuillue et forêt mixte).

Occupation du sol (1993)

Forêt résineuse, forêt feuillue et forêt mixte

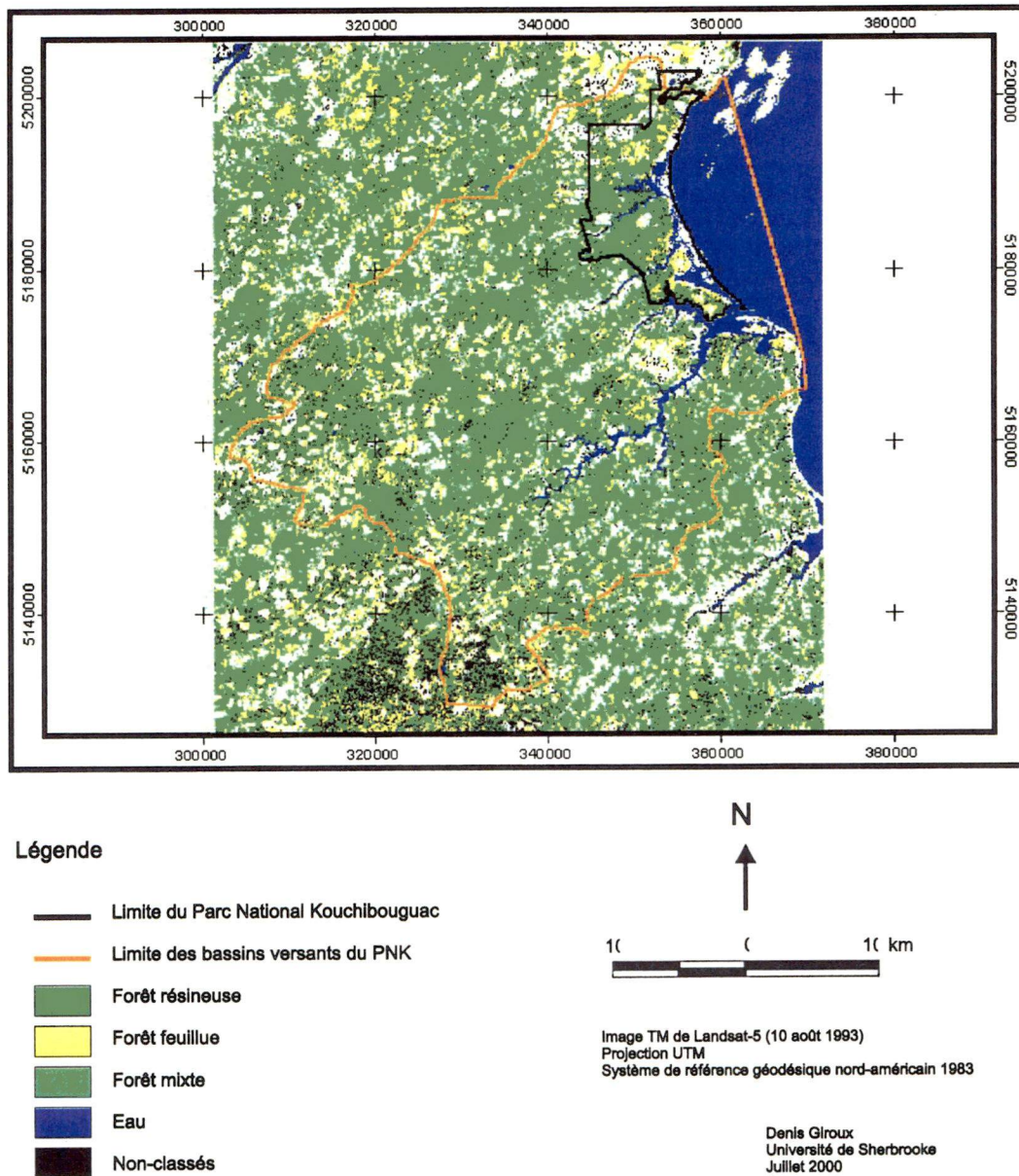


Figure 45 - Occupation du sol en 1993 (forêt résineuse, forêt feuillue et forêt mixte).

Sur les figures 46 et 47, nous comparons la classe **milieu agricole** en 1977 et 1993. On constate que cette classe est plus présente dans la partie sud-ouest de l'image TM que dans le même secteur de l'image MSS. On observe, dans les portions est et sud-est des images, que le milieu agricole se concentre en bordure des cours d'eau et qu'il est plus visible en 1977 qu'en 1993.

Occupation du sol (1977)

Milieu agricole

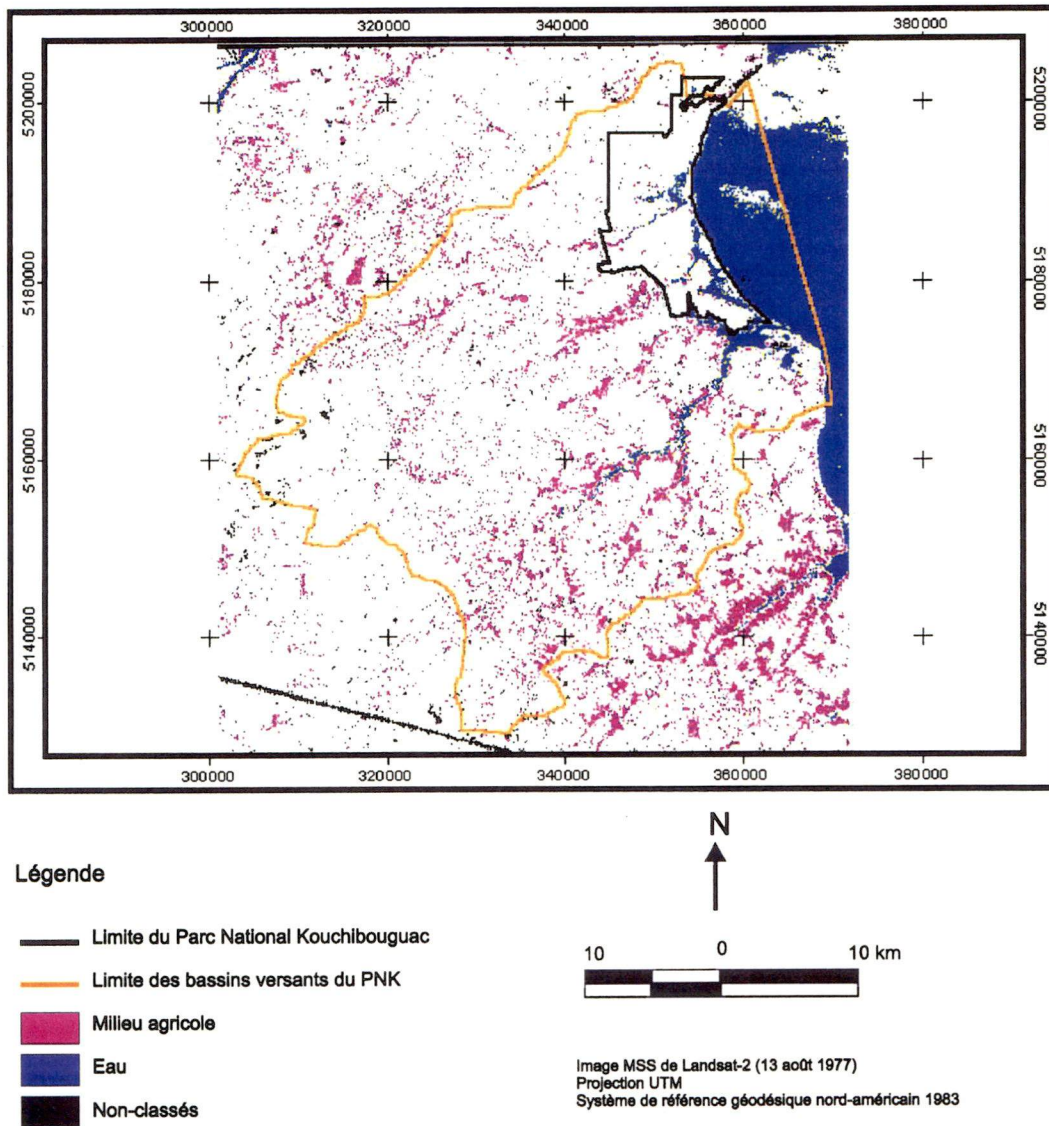


Figure 46 - Occupation du sol en 1977 (milieu agricole).

Occupation du sol (1993)

Milieu agricole

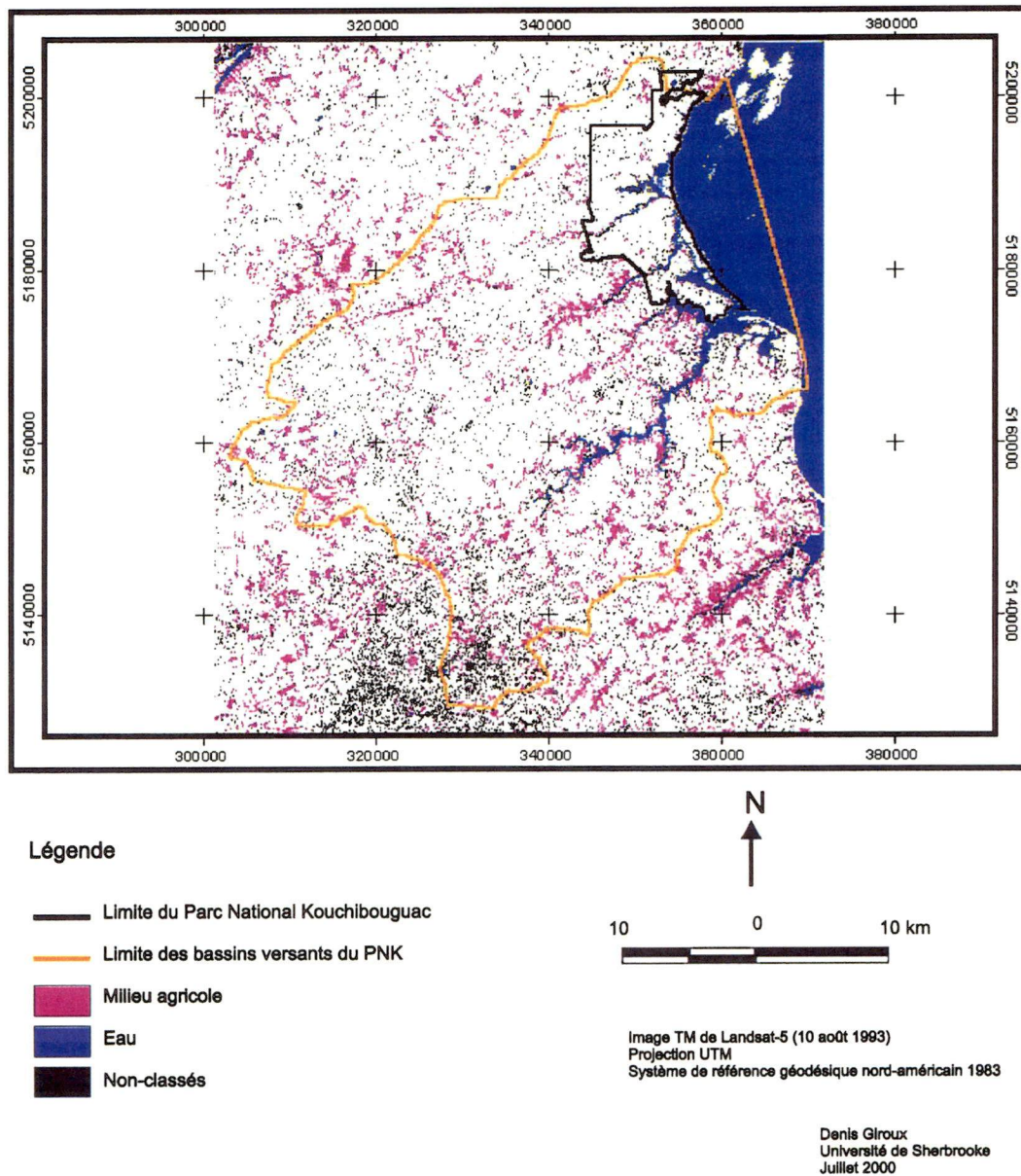


Figure 47 - Occupation du sol en 1993 (milieu agricole).

Les figures 48 et 49 montrent la répartition des classes **régénération forestière, coupes forestières/sols nus**. Les secteurs en régénération semblent plus dispersés sur le territoire en 1993 qu'en 1977. Ceux-ci paraissent également plus nombreux à l'intérieur de la limite des bassins versants en 1993 qu'en 1977. On constate aussi qu'il y a plus de secteurs en régénération dans la partie sud-ouest de l'image TM que de l'image MSS. Toutefois, on remarque que l'image MSS présente plusieurs surfaces en régénération (plusieurs petites surfaces très rapprochées), surtout dans ses parties ouest et nord-ouest.

Quant à la classe **sols nus**, elle se fait plus présente dans les parties sud et sud-ouest de l'image TM que de l'image MSS. Les deux zones rouges, au nord et au sud de la limite du PNK, situées à une longitude similaire sur l'image TM, sont des tourbières en exploitation (qui ne l'étaient pas en 1977 (Shaw, 1986)) où le sol est dépourvu de toute végétation.

Occupation du sol (1977)

Régénération et coupes forestières, sols nus

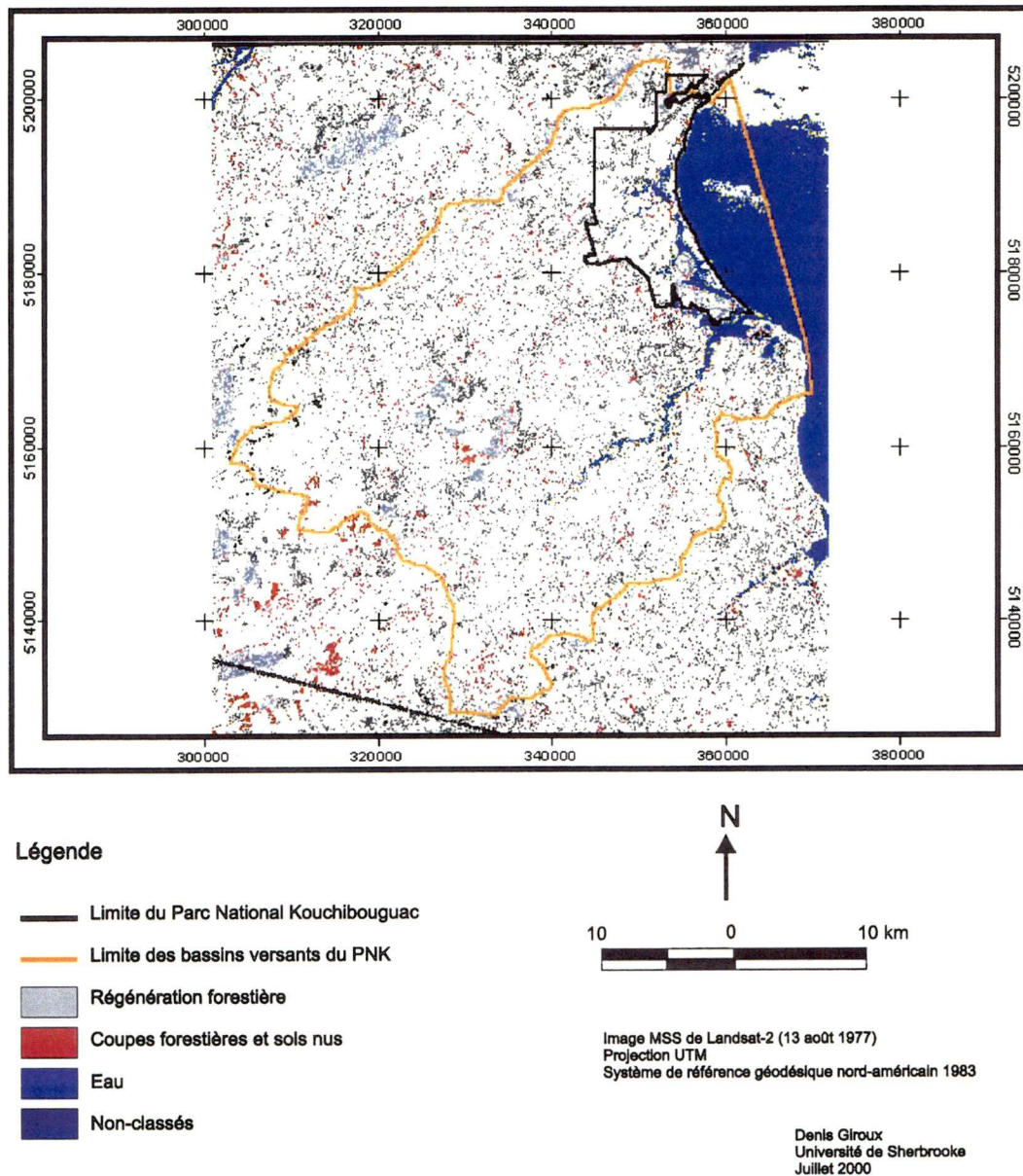


Figure 48 - Occupation du sol en 1977 (régénération, coupes forestières et sols nus).

Occupation du sol (1993)

Régénération et coupes forestières, sols nus

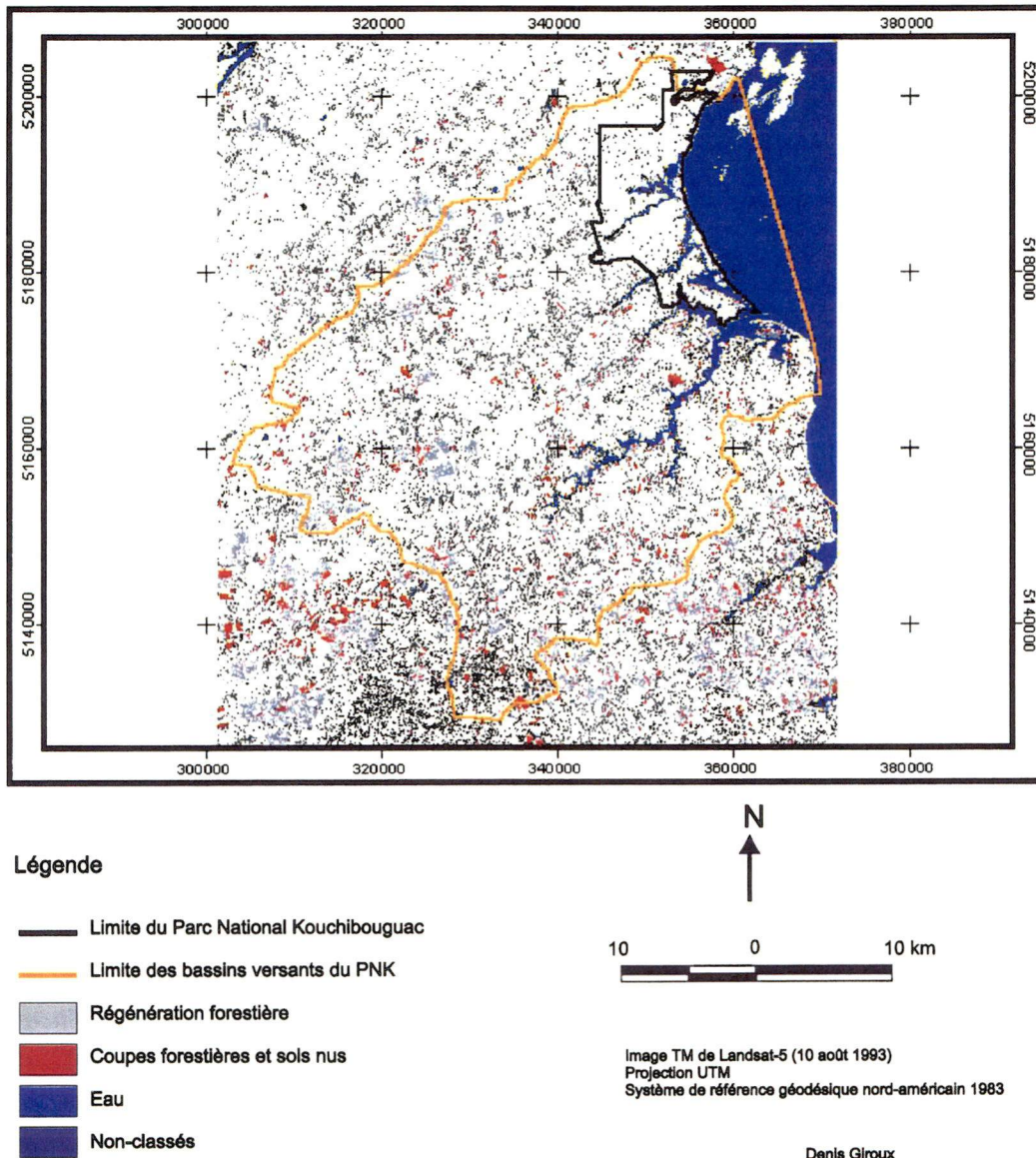
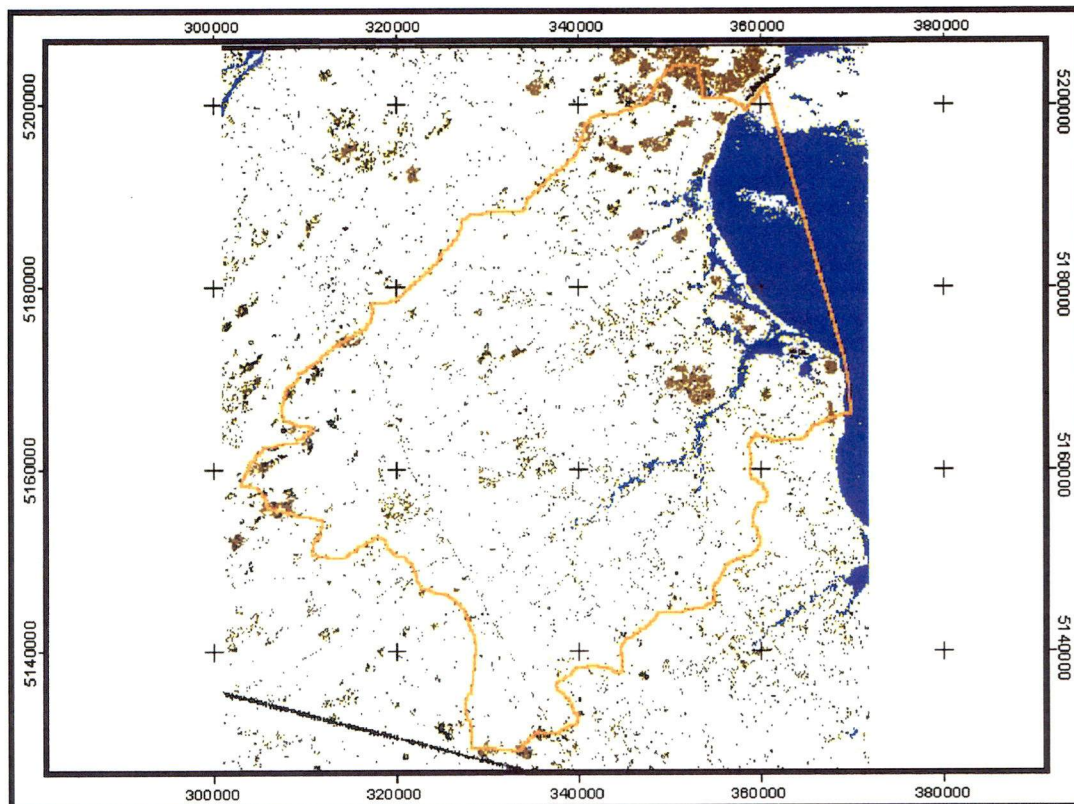


Figure 49 - Occupation du sol en 1993 (régénération, coupes forestières et sols nus).

Sur les figures 50 et 51, nous nous attardons sur les classes **milieu humide**, **dunes/plages** et **eau**. On observe que le milieu humide est mieux défini sur l'image TM (figure 51) que sur l'image MSS (figure 50), principalement dans les portions nord et nord-ouest de l'image. La classe **dunes/plages**, à l'est des images, est difficilement distinguable. Quant à la classe **eau**, elle est mieux définie sur l'image TM, particulièrement dans les secteurs où les cours d'eau sont moins larges (moins de 30 mètres). On doit cependant souligner que les trois classes analysées ont probablement peu changé ou évolué de 1977 à 1993. Les changements que nous observons sont dus à la meilleure résolution spatiale de l'image TM.

Occupation du sol (1977)

Milieu humide, dunes et plages, eau



Légende

- Limite des bassins versants du PNK
- Milieu humide
- Dunes et plages
- Eau
- Non-classés

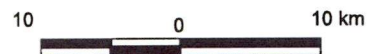


Image MSS de Landsat-2 (13 août 1977)
Projection UTM
Système de référence géodésique nord-américain 1983

Denis Giroux
Université de Sherbrooke
Juillet 2000

Figure 50 - Occupation du sol en 1977 (milieu humide, dunes et plages, eau).

Occupation du sol (1993)

Milieu humide, dunes et plages, eau

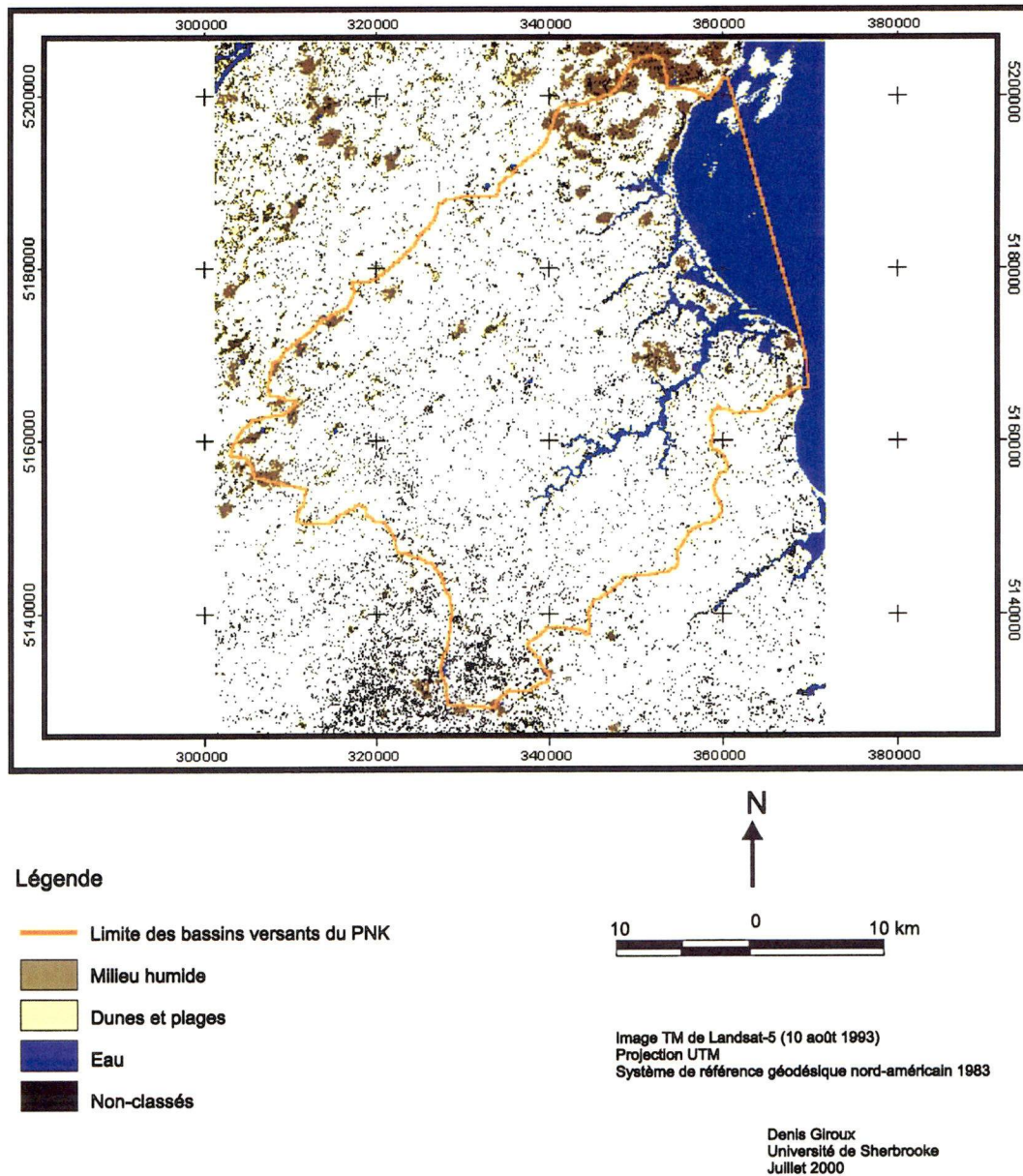


Figure 51 - Occupation du sol en 1993 (milieu humide, dunes et plages, eau).

Finalement, les figures 52 et 53 montrent la classe **milieu urbanisé/sols nus**. Sur les deux images, cette classe est difficile à distinguer. Elle est plus facilement observable sur l'image MSS, dans la partie est de la figure, au sud de la limite du PNK. On parvient à faiblement distinguer, dans la portion est des images, quelques axes de communication.

Occupation du sol (1977)

Milieu urbanisé et sols nus

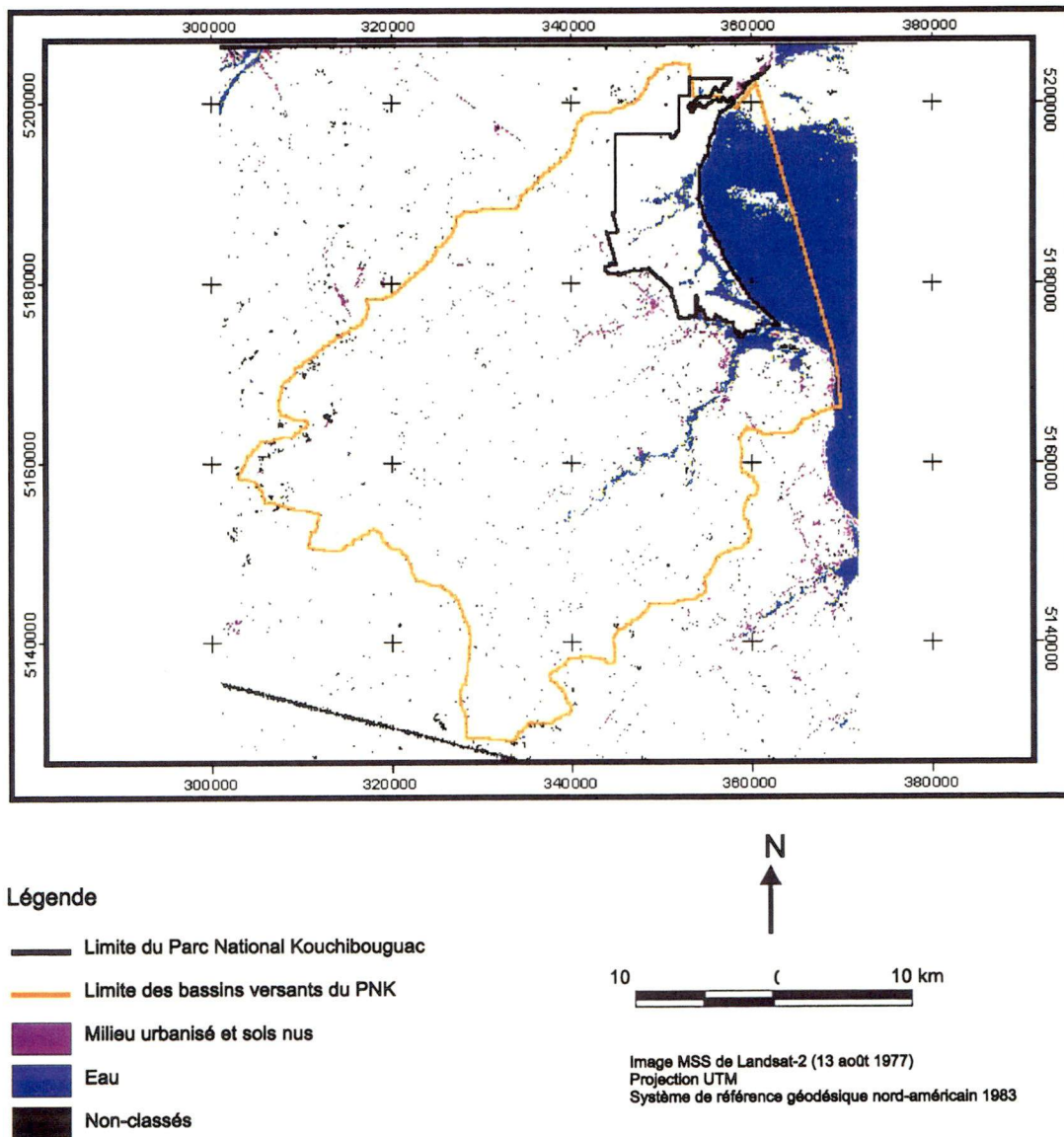
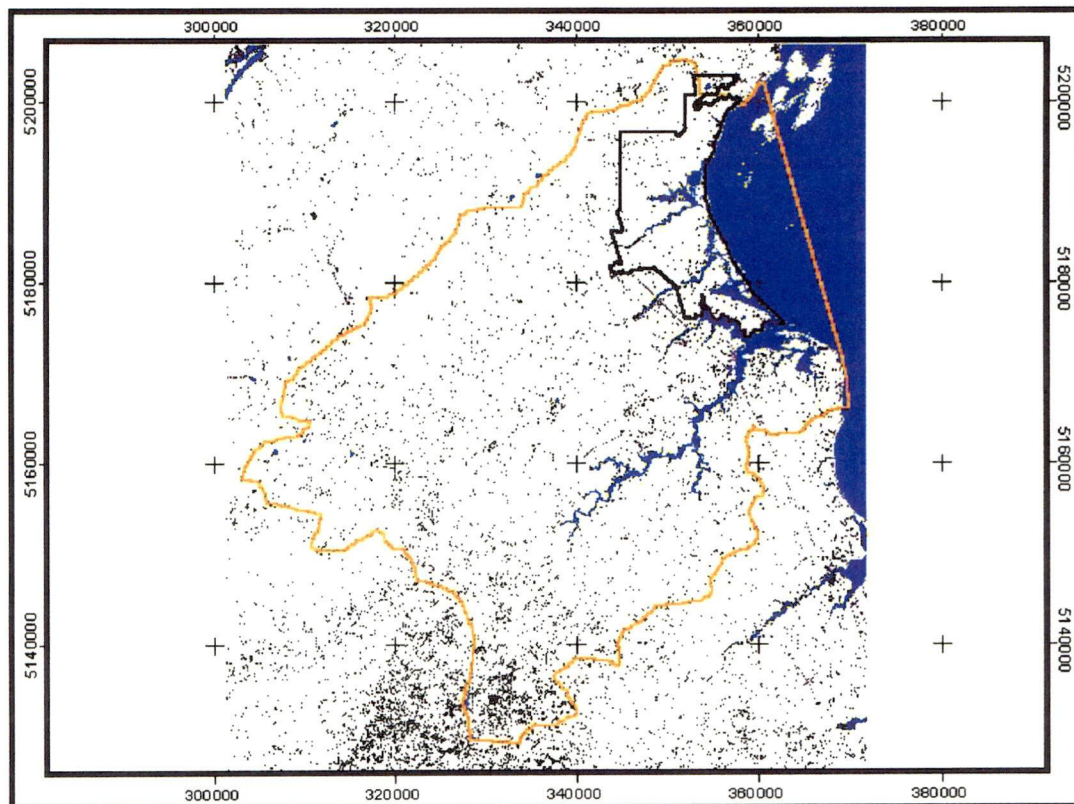







Figure 52 - Occupation du sol en 1977 (milieu urbanisé et sols nus).

Occupation du sol (1993)

Milieu urbanisé et sols nus



Légende

-  Limite du Parc National Kouchibouguac
-  Limite des bassins versants du PNK
-  Milieu urbanisé et sols nus
-  Eau
-  Non-classés

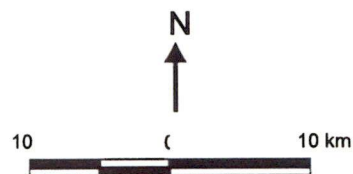


Image TM de Landsat-5 (10 août 1993)
Projection UTM
Système de référence géodésique nord-américain 1983

Denis Giroux
Université de Sherbrooke
Juillet 2000

Figure 53 - Occupation du sol en 1993 (milieu urbanisé et sols nus).

5.3. Analyse de la fragmentation des habitats par imagerie satellitaire

Les observations et commentaires sur la fragmentation des habitats présentées dans les pages suivantes s'appuient sur une analyse visuelle des images MSS et TM classifiées et non sur les faits observés directement sur le terrain.

L'annexe 5 comprend deux cartes montrant la fragmentation des habitats. Afin de faciliter la consultation de ces figures, nous avons regroupé les trois classes forestières en une seule (vert). Les autres classes, à l'exception des classes **dunes/plages, hauts-fonds et non-classés**, ont également été regroupés sous une seule couleur (rouge). Le **milieu humide** (brun-jaune) ne fait pas partie de ces regroupements. À partir des deux cartes, nous constatons que la fragmentation est plus prononcée sur l'image TM que sur l'image MSS. Les zones rouges fragmentent davantage les zones vertes en 1993 qu'en 1977. L'accroissement de la fragmentation semble particulièrement marqué dans la partie sud-ouest de l'image TM. C'est un secteur où des coupes forestières ont été observées lors des visites sur le terrain.

Les observations sur la fragmentation mentionnées dans le paragraphe précédent s'appuyaient sur les images satellites classifiées et ne permettent pas une analyse très poussée en milieu urbanisé. Selon les gestionnaires du PNK, la fragmentation due au **milieu urbanisé/sols nus** a augmentée de 1977 à 1993. Selon eux, il y a eu un agrandissement des villages autour du PNK et, dans la ZIC, une augmentation de la population, une hausse du nombre d'habitations résidentielles empiétant progressivement sur le **milieu agricole** et une augmentation du nombre de corridors de communication (e.g. la route 11 passant à proximité du PNK dans l'axe nord-ouest/sud-est). Nous parvenons difficilement à observer ces faits à l'aide des images MSS et TM. Les images-satellite MSS et TM ne sont donc pas très utiles pour l'étude de la fragmentation en milieu urbanisé. Une nouvelle méthode de classification des images-satellite n'apporterait pas de résultats supplémentaires si la résolution spatiale de ces dernières n'est pas plus fine.

6. Interprétation des résultats

En confrontant les résultats obtenus à l'hypothèse émise au début du projet, on constate qu'il est possible d'établir quelles sont les différentes formes d'utilisation du sol de la ZIC, et de déceler les changements, par l'analyse multitemporelle d'images MSS et TM de Landsat. Nous devons toutefois nuancer ce jugement en affirmant que les divers traitements effectués sur les deux images permettent surtout d'identifier les formes majeures d'utilisation du sol. Pour les classes **forêts** (résineuse, feuillue, mixte), **coupes forestières/sols nus**, **milieu humide**, **eau**, **hauts-fonds** et **nuages**, la moyenne de pixels correctement classifiés est de 86 % pour l'image MSS et de 91 % pour l'image TM. Pour les classes **régénération forestière**, **milieu agricole**, **dunes/plages** et **milieu urbanisé**, la moyenne de pixels correctement classifiés (PPCC) n'est que de 65 % pour l'image MSS et de 70 % pour l'image TM. L'évaluation de l'authenticité des changements est donc considérablement limitée pour ces quatre dernières classes, et ce, sur les deux images.

L'apport complémentaire de la photographie aérienne est indispensable vu la piètre séparabilité de certaines signatures spectrales obtenues pour les deux images-satellite et la résolution spatiale insuffisante en milieux fortement morcelés. Les classes **milieu agricole** (regroupant champs cultivés et champs en friche), **dunes/plages** (où la végétation est absente sur la plage mais présente sur la crête de la dune) et **milieu urbanisé** (regroupant agglomérations et corridors de communication) sont des exemples de piètre séparabilité des signatures spectrales. Sur l'image MSS nous avons dû regrouper des classes que l'on souhaitait cartographier de façon distincte. Il en fut de même pour certaines classes de l'image TM. L'image MSS a considérablement limité l'analyse car on devait s'appuyer sur celle-ci pour établir le nombre de classes qui permettront de comparer les deux images. Cependant, les faibles pourcentages de variation obtenus pour certaines classes sur chacune des images nous amène à s'interroger sérieusement sur la validité de nos résultats. Les perturbations et interventions majeures d'origine

humaine à l'intérieur des limites du PNK furent probablement minimales de 1977 à 1993. Toutefois, selon les divers intervenants (e.g. écologiste du PNK et chercheurs universitaires) qui assurent un suivi du PNK et, depuis quelques années, des activités se déroulant dans sa zone environnante (la ZIC), les perturbations tels les feux de forêts et les coupes forestières, dans la ZIC, sont importantes. De plus, les photographies aériennes et les deux versions du réseau routier vectoriel superposé aux images MSS et TM témoignent, sans équivoque, d'une urbanisation croissante.

Les informations limitées extraites des deux images-satellite ne permettent pas d'atteindre le niveau d'analyse souhaité par les gestionnaires du PNK, ce qui se traduirait par un plus grand nombre de classes pour chacune des images et par une plus grande certitude quant à l'identification et à la délimitation des différents types d'utilisation du sol. On souhaitait, par exemple, pouvoir distinguer les marécages, les marais salés et les tourbières.

Si l'on considère que les classes **hauts-fonds, dunes/plages, eau et milieu humide** sont des milieux où il y a peu d'interventions humaines majeures, la méthode utilisée (le SIG et les images-satellite) semble valide pour ces classes car nous observons des variations de superficies relativement faibles (inférieures à 1,2 %). Pour les forêts résineuse, feuillue et mixte, les variations de superficies, de 1977 à 1993, sont plus importantes, soit respectivement -3,2 %, -5,3 % et +4,7 %. Le PPCC est de 73,8 % ou plus pour ces classes. Toutefois, de nombreuses coupes forestières ont été observées lors des visites sur le terrain. Elles amènent des variations significatives des superficies des classes forestières. On doit donc les considérer en même temps que le PPCC de ces classes. On ne peut donc affirmer que l'on effectue un suivi (ou *monitoring*) efficace des changements d'utilisation du sol car on ne parvient pas toujours à identifier et, particulièrement, à délimiter avec précision les différents types d'utilisation du sol. La méthode utilisée est valide pour certaines classes mais les données temporelles disponibles (l'image MSS de 1977) sont limitatives. La

photographie aérienne devient rapidement indispensable pour identifier et, surtout, délimiter les structures.

La seule étude par rapport à laquelle nous pouvons comparer la classification obtenue est celle d'Aménatech (1995) et ce, pour l'image TM seulement. Leur étude n'avait pas pour but d'analyser l'évolution de l'utilisation du sol mais plutôt d'offrir un constat de l'état du territoire au moment de l'acquisition de l'image TM. Aménatech (1995) utilisait la même image TM que dans la présente étude. Comme ils n'étaient pas contraints de réduire leur nombre de classes d'utilisation du sol pour permettre une comparaison avec une image MSS, celles-ci sont plus nombreuses que dans l'étude présentée ici. Aménatech (1995) constate néanmoins, comme dans le présent mémoire, que quelques classes identifiées présentent des confusions entre elles dues à leur ressemblance spectrale et à la résolution spatiale de l'image TM.

Quant aux résultats de l'analyse de la fragmentation des habitats, il faut garder à l'esprit qu'une analyse beaucoup plus poussée, et probablement plus concluante, pourrait être effectuée à partir d'images satellitaires ou aéroportées, ayant une résolution spatiale plus fine que celles des images MSS et TM utilisées dans cette étude. L'utilisation de photographies aériennes, bien que plus onéreuses et demandant un effort d'interprétation considérable, permettrait de mieux évaluer les tendances de la fragmentation des habitats. Si l'on confronte la réalité constatée sur le terrain ainsi que les observations des gestionnaires du PNK sur l'évolution du territoire autour du Parc (urbanisation croissante, nouvelles routes depuis 1977) aux résultats obtenus, dans cette étude, sur la fragmentation des habitats, ces faits démontrent les limites de la méthode utilisée (i.e. les images-satellite) pour observer la fragmentation et non pas que la méthode de classification de ces images n'est pas au point.

7. Conclusion et recommandations

L'utilisation d'une image MSS et TM de Landsat a permis d'identifier les formes majeures d'utilisation du sol. Toutefois, nous devons constamment tenir compte des pourcentages de pixels correctement classifiés (PPCC) lorsque nous analysons les changements des superficies. Il devient alors difficile de se prononcer avec certitude sur l'importance des variations des différentes classes d'utilisation du sol (i.e. les variations de superficies) et les véritables tendances d'utilisation du sol.

L'utilisation de capteurs aéroportés ou spatiaux [passifs ou actifs (radar)] possédant une résolution plus fine que ceux utilisés dans cette étude serait à considérer. Une amélioration de la précision de la classification, un plus grand nombre de classes d'utilisation du sol et une plus grande certitude quant à l'identification et la délimitation des différentes formes d'utilisation du sol permettrait d'effectuer un suivi (un *monitoring*) plus rigoureux de ces dernières. De plus, la caractérisation et la cartographie de la fragmentation de l'habitat, notion importante dans la gestion des aires protégées, s'en trouverait facilitée.

L'utilisation de photographies aériennes, particulièrement à une échelle de 1:10 000, demeure une méthode efficace d'identification des types d'utilisation du sol malgré les coûts, le grand nombre de photographies requises pour une petite superficie et la somme de travail nécessaire pour intégrer l'information photo-interprétée dans un SIG. On pourrait envisager l'utilisation de la télédétection spatiale ou aéroportée (à fine résolution spatiale) pour l'étude de la ZIC dans son ensemble alors que les photographies aériennes pourraient être utilisées dans les secteurs où l'on désire effectuer un suivi plus précis ou dans les zones fortement morcelées (e.g. : milieu urbain). Elles pourraient également être utilisées dans les secteurs où l'on doute du résultat obtenu par télédétection.

Le choix d'images-satellite ayant un faible couvert nuageux (et prises à la même période de leur année respective) était plutôt restreint lorsque la présente étude a

débuté. En considérant le lancement des satellites Radarsat-1 et Ikonos (ayant une résolution spatiale de 4 m) au cours des dernières années et, dans quelques mois (2002?), de Radarsat-2, il serait intéressant de vérifier si ces satellites permettront d'observer des changements majeurs d'utilisation du sol par rapport à l'image TM de 1993. Ils permettraient, sans doute, d'obtenir un plus grand nombre de classes d'utilisation du sol que dans la présente étude.

Si l'on désire étudier de façon très détaillée la fragmentation des habitats et obtenir des résultats plus probants que ceux présentés ici, il faudra se concentrer sur de petites portions de la ZIC où l'on pourra identifier et délimiter avec certitude l'utilisation du sol. Le logiciel *Fragstats*, dédié spécialement à l'étude de la fragmentation des habitats, exige une classification beaucoup plus précise que celle obtenue dans ce rapport.

À la lumière des résultats obtenus ici, il serait justifié d'effectuer un suivi à courte échéance afin de vérifier l'évolution de l'utilisation du sol présentée dans cette étude. Comme l'image TM utilisée datait de 1993, il serait pertinent de refaire une étude du même type au cours des deux ou trois prochaines années, en se servant de cette image comme référence. La fréquence de l'étude de l'utilisation du sol pourrait donc être de 7 à 10 ans.

Références

Aménatech Inc. (1995) **Cartographie de l'utilisation du sol par télédétection des bassins versants du Grand Écosystème de Kouchibouguac et intégration dans un SIG (*Spans*)**. Rapport final; Parc national de Kouchibouguac, 29 p.

Banner, A.V., Lynham, T. (1981) **Analyse multi-temporelle de données Landsat pour la cartographie des déboisements: essai de deux techniques**. Compte rendu du 7^{ième} symposium canadien sur la télédétection. Winnipeg, Manitoba, 8 au 11 septembre 1981, p. 233-240.

Beaubien, J. (1986) **Visual Interpretation of Vegetation Through Digitally Enhanced Landsat-MSS Images**. Remote Sensing Reviews, vol. 2, p. 111-143.

Beaubien, J. (1987) **Méthodologies d'accentuation des images TM pour une meilleure discrimination des couverts forestiers**. Onzième symposium canadien sur la télédétection. Waterloo, Ontario, 22 au 25 juin 1987, p. 227-237.

Bonn, F., Rochon, G. (1992) **Précis de télédétection – Volume 1 – Principes et méthodes**. Presses de l'Université du Québec (AUPELF). Sainte-Foy, Québec, Canada, 485 p.

Byrne, G.F., Crapper, P.F., Mayo, K.K. (1980) **Monitoring Land-Cover Change by Principal Component Analysis of Multitemporal Landsat Data**. Remote Sensing of Environment, vol.10, no 3, p. 175-184.

Campbell, J.B. (1987) **Introduction to Remote Sensing**. The Guilford Press, New York, 551 p.

Crist, E.P., Cicone, R.C. (1984) **A Physically-Based Transformation of Thematic Mapper Data -- The Tasseled Cap**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. GE-22, no 3, p. 256-263.

Desloges, C. (1979) **Les ressources naturelles du parc national de Kouchibouguac**. Parcs Canada, Région de l'Atlantique, 137 p.

Environnement Canada (1993) **Plan de gestion; Parc national Kouchibouguac**. Service des parcs, Région de l'Atlantique, 75 p.

Environnement Canada (2000) **Fragmentation, modification ou perte de l'habitat** in Service canadien de la faune, Environnement Canada (Service canadien de la faune), <http://www.cws-scf.ec.gc.ca/canbird/pif/habitfr.htm>

Fowler, D. (2000) **New Brunswick GIS Data Dictionary**. New Brunswick Forest Database, Department of Natural Resources and Energy of New Brunswick, 26 p.

Fowler, D. (2001) Communication personnelle. Department of Natural Resources and Energy of New Brunswick.

Fung, T., LeDrew, E. (1987) **L'intégration de données de résolutions spatiales variées provenant de la télédétection pour la détection des changements dans la couverture terrestre (Integrating Remotely Sensed Data of Different Spatial Resolutions for Land Cover Change Detection)**. Proceedings of the 11th Canadian Symposium on Remote Sensing, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, June 22-25, 1987, p. 137-145.

Fung, T., Zhang, Q. (1989) **Land Use Change Detection and Identification with Landsat Digital Data in the Kitchener-Waterloo Area**. in C.R. Bryant, E.F. LeDrew, C. Marois, F. Cavayas (ed.). Remote Sensing and Methodologies of Land Use Change Analysis. Department of Geography Publications Series, Occasional Paper No. 6, University of Waterloo, Ontario, p. 135-153.

Howarth, P.J., Boasson, E. (1983) **Landsat Digital Enhancements for Change Detection in Urban Environments**. Remote Sensing of Environment, vol. 13, no 1, p. 149-160.

Howarth, P.J., Wickware, G.M. (1981) **Procedures for Change Detection Using Landsat Digital Data**. International Journal of Remote Sensing, vol. 2, no 3, p. 277-291.

Ingebritsen, S.E., Lyon, R.J.P. (1985) **Principal Components Analysis of Multitemporal Image Pairs**. International Journal of Remote Sensing, vol. 6, no 5, p. 687-696.

Jensen, J.R. (1986) **Introductory Digital Image Processing (a Remote Sensing Perspective)**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 379 p.

Lafrance, P. (1987) **Évaluation de rehaussements et de classifications non-supervisées d'images MSS, TM et SPOT, pour la télédétection d'un complexe de milieux humides de l'île d'Anticosti (Québec)**. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Québec, 90 p.

Lillesand, T.M., Kiefer, R.W. (1979) **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons, New York, 750 p.

Lodwick, G.D. (1979) **Measuring Ecological Changes in Multitemporal Landsat Data Using Principal Components**. Proceedings of the 13th International Symposium on Remote Sensing of Environment, vol. 2, Ann Arbor, Michigan (U.S.A.), April 23-27, 1979, p. 1131-1141.

Malila, W.A. (1980) **Change Vector Analysis: an Approach for Detecting Forest Changes with Landsat**. Proceedings, Machine Processing of Remotely Sensed Data, West Lafayette, Indiana, Laboratory for the Applications of Remote Sensing, p. 326-335.

Nelson, R.F. (1982) **Detecting Forest Canopy Change Using Landsat**. NASA technical memorandum 83918, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, U.S.A., 80 p.

Nelson, R.F. (1983) **Detecting Forest Canopy Change Due to Insect Activity Using Landsat MSS**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 49, no 9, p. 1303-1314.

Parcs Canada (2000) **Fragmentation des écosystèmes** in Conservation des écosystèmes, Parcs Canada, http://parkscanada.pch.gc.ca/natress/ENV_CON/ECO_MAN/ECO_FRA/ECO_FRAf.HTM

Poulin, A. (2001) Communication personnelle. Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke.

Robinson, J.W. (1979) dans Singh, A. (1989) **A Critical Review of the Change Detection and Urban Classification Literature**. Technical memorandum CSC/TM-79/6235, Computer Sciences Corporation, Silver Springs, Maryland, U.S.A. (nombre de pages indéterminé)

Ruel, M. (1999) **Une approche de gestion des risques environnementaux : le cas de la zone d'influence et de coopération du parc national Kouchibouguac (Nouveau-Brunswick)**. Mémoire de maîtrise en géographie Université de Sherbrooke, Québec, 150 p.

Ryerson, R. A. (1980) **Land Use Information from Remotely Sensed Data**. Energy, Mines and Resources Canada, Canada Centre for Remote Sensing, Ottawa, 30 p.

Shaw (1986) **Distribution of Peatlands Leased or Having Development Potential**. Department of Natural Resources and Energy, New Brunswick, 1: 500 000, Map plate 86-49 (Revised December 1994).

Singh, A. (1989) **Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data**. International Journal of Remote Sensing, vol. 10, no 6, p. 989-1003.

Stow, D.A., Tinney, L.R., Estes, J.E. (1980) **Deriving Land Use/Land Cover Change Statistics from Landsat: a Study of Prime Agricultural Land**. Proceedings of the 14th international symposium on Remote Sensing of Environment, vol. 2, San Jose, Costa Rica, April 23-30, 1980, p. 1227-1237.

Thompson, M.D. (éditeur) [Howarth, P.J., Ryerson, R.A., Bonn, F.J (auteurs et éditeurs senior)] (1982) **Utilisation de Landsat pour observer les changements géographiques du Canada**. Centre Canadien de télédétection, Énergie, Mines et Ressources, Canada, 84 p.

Tremblay, E., Beach, H. (1994) **Ecosystem Conservation Plan; Kouchibouguac National Park**. Environment Canada, Canadian Parks Service, Atlantic Region, 95 p.

Tucker, C.J. (1979) **Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation**. Remote Sensing of Environment, vol. 8 no 2, p. 127-150.

Varty, I.W. (1980) **Environmental Surveillance in New-Brunswick, 1978-79 Effects of Spray Operations for Forest Protection Against Spruce Budworm**. Report by: The Committee for Environmental Monitoring of Forest Insect Control Operations (EMOFICO), Department of Forest Resources, University of New-Brunswick, Fredericton (New-Brunswick), 76 p.

Vogelmann, J.E. (1988) **Detection of Forest Change in the Green Mountains of Vermont Using Multispectral Scanner Data**. International Journal of Remote Sensing, vol. 9, no 7, p. 1187-1200.

Weismiller, R.A., Kristof, S.J., Scholz, D.K., Anuta, P.E., Momin, S.A. (1977) **Change Detection in Coastal Zone Environment**. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 43, no 12, p. 1533-1539.

Annexe 1

Le support numérique (CD-ROM #1) joint au présent document contient les images (TM et MSS) classifiées (en format **.JPG** pour *CorelDraw*, en format **.PS** et **.TIF** pour *ArcView GIS 3.0*, en format **.TIF** et **.PIX** pour *Image Handler* de *PCI*). Elles permettent de visualiser en détail l'utilisation du sol et les changements survenus pour la portion étudiée de la ZIC, ses bassins versants et le PNK. Le tableau 6 présente la liste des fichiers numériques ainsi qu'une brève description de leur contenu. L'annexe 2 présente une version imprimée (format 8 ½ x 11 pouces) de ces images.

Tableau 6 - Fichiers sur le disque compact (CD-ROM) joint à ce document.

Nom du fichier sur CD-ROM	Description
lma77map.ps lma77map.jpg	Occupation du sol en 1977 pour la portion étudiée de la zone d'influence et de coopération (ZIC)
lma93map.ps lma93map.jpg	Occupation du sol en 1993 pour la portion étudiée de la ZIC
Pnk77map.ps Pnk77map.jpg	Occupation du sol en 1977 dans le PNK seulement
Pnk93map.ps Pnk93map.jpg	Occupation du sol en 1993 dans le PNK seulement
Bv77map.ps Bv77map.jpg	Occupation du sol en 1977 dans les bassins versants du PNK
Bv93map.ps Bv93map.jpg	Occupation du sol en 1993 dans les bassins versants du PNK
Kouc93bv.tif	Occupation du sol en 1993 pour la portion étudiée de la ZIC (image TM classifiée pour visualisation avec le logiciel <i>Image Handler</i> de <i>PCI</i> et <i>ArcView</i>)
Kouc93bv.pix	Portion étudiée de la ZIC pour l'image TM de Landsat (image brute pour visualisation avec le logiciel <i>Image Handler</i> de <i>PCI</i> seulement)
(suite de ce tableau à la page suivante)	

Kou77bv2.tif	Occupation du sol en 1977 pour la portion étudiée de la ZIC (image MSS classifiée pour visualisation avec le logiciel <i>Image Handler</i> de <i>PCI</i> et ArcView)
Kou77bv2.pix	Portion étudiée de la ZIC pour l'image MSS de Landsat (image brute pour visualisation avec le logiciel <i>Image Handler</i> de <i>PCI</i> seulement)
Pci63win.exe	Logiciel <i>Image Handler</i> de <i>PCI</i> (cliquer <i>setup.exe</i> pour installer le logiciel)
Changrid	<i>Grid</i> résultant de la commande <i>Combine</i> dans ArcInfo 8. C'est la «carte» des zones de changements.

Annexe 2

Cartes d'utilisation du sol en 1977 et 1993 pour la portion de la ZIC étudiée, les bassins versants et le PNK.

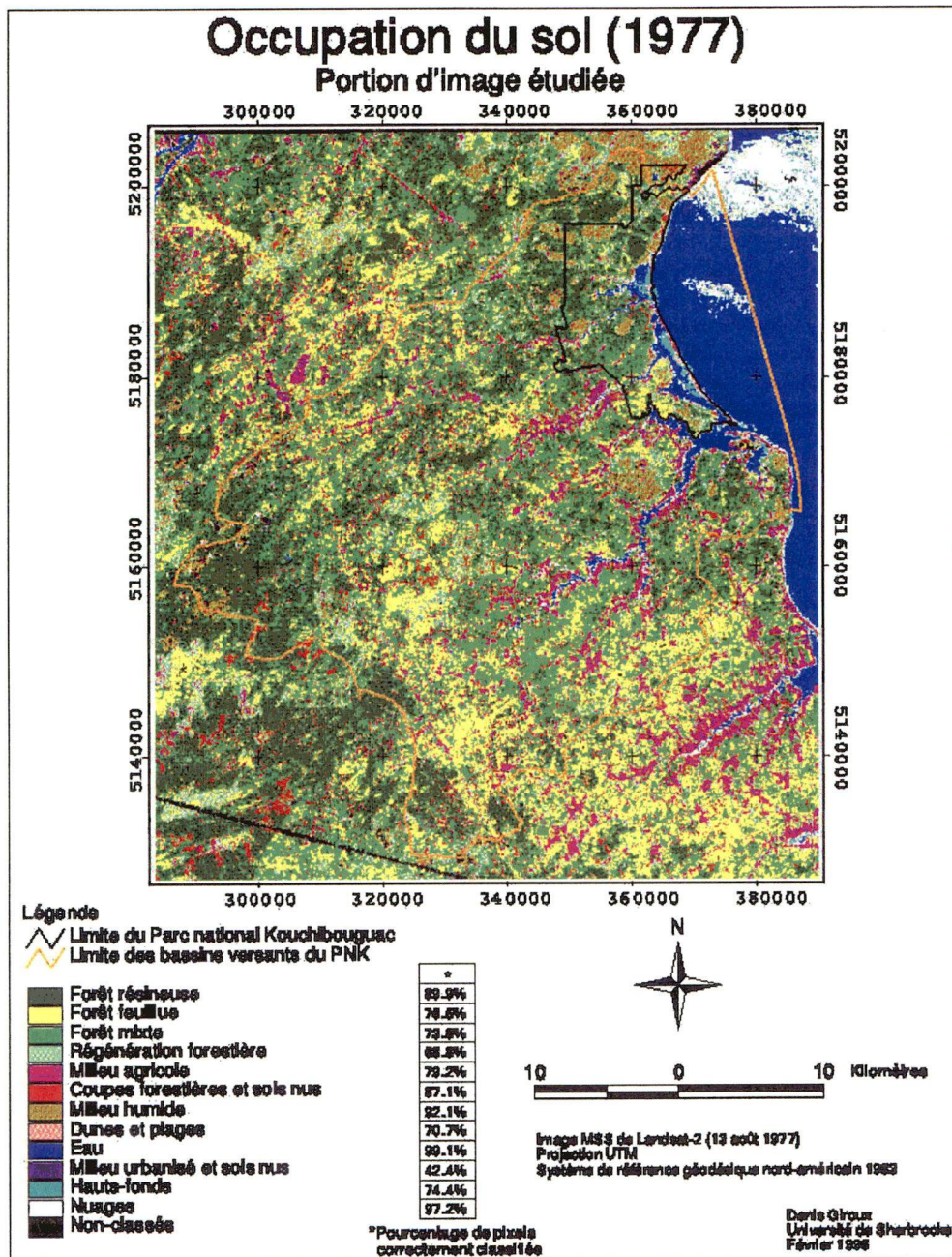


Figure 54 - Occupation du sol en 1977 (portion d'image étudiée). Toutes les classes.
Voir la carte grand format dans la pochette en annexe.

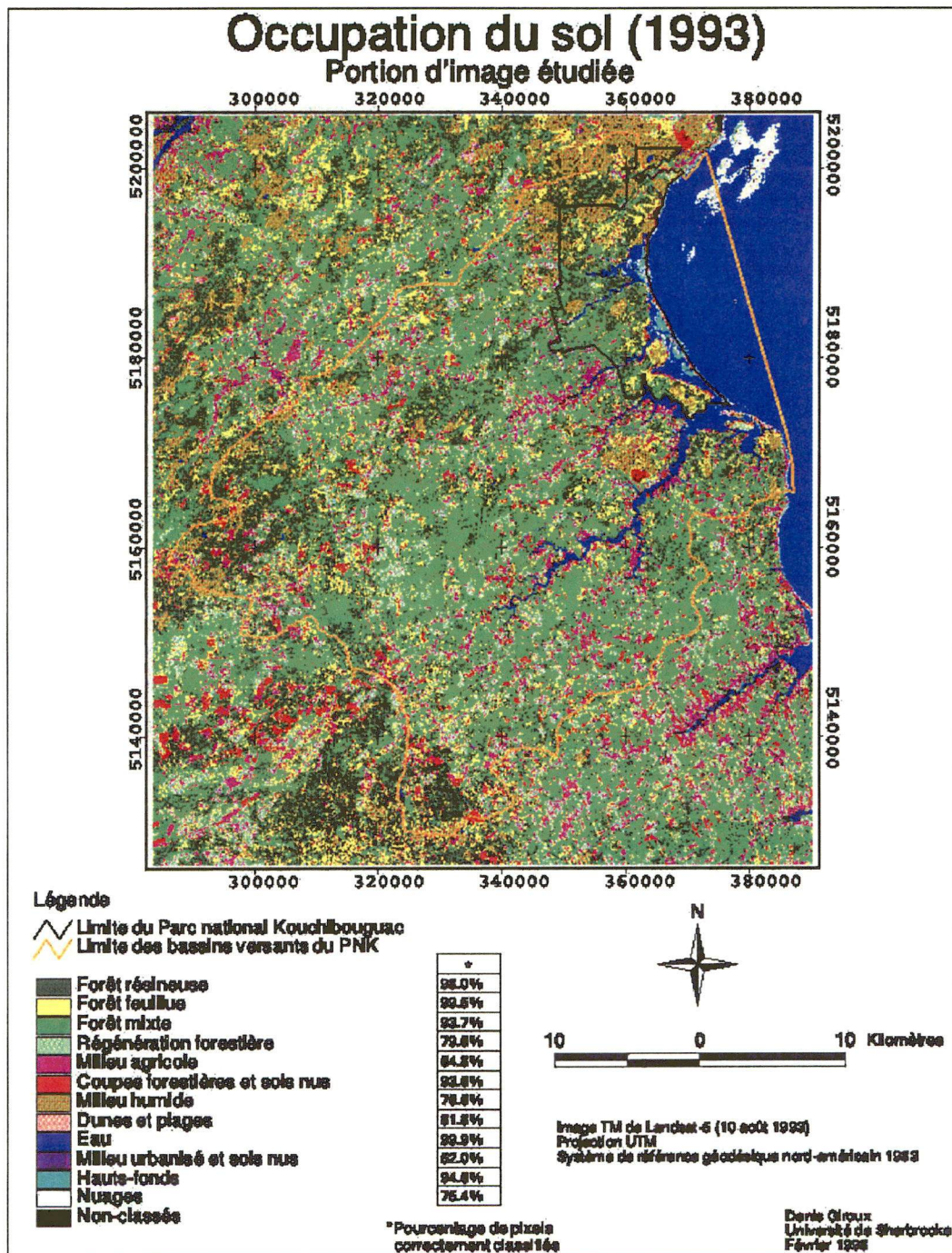


Figure 55 - Occupation du sol en 1993 (portion d'image étudiée). Toutes les classes.
Voir la carte grand format dans la pochette en annexe.

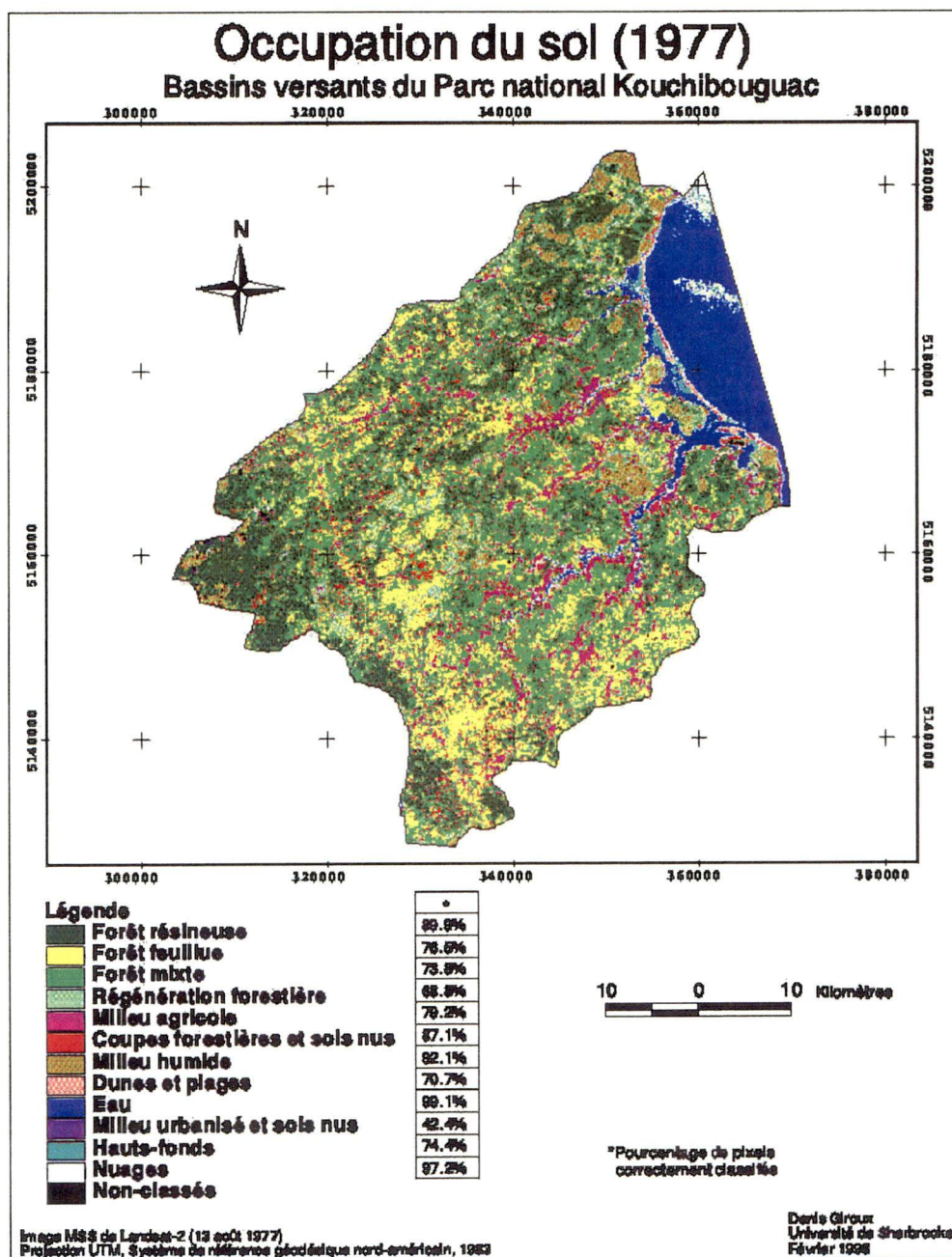


Figure 56 - Occupation du sol en 1977 (bassins versants du PNK). Toutes les classes.

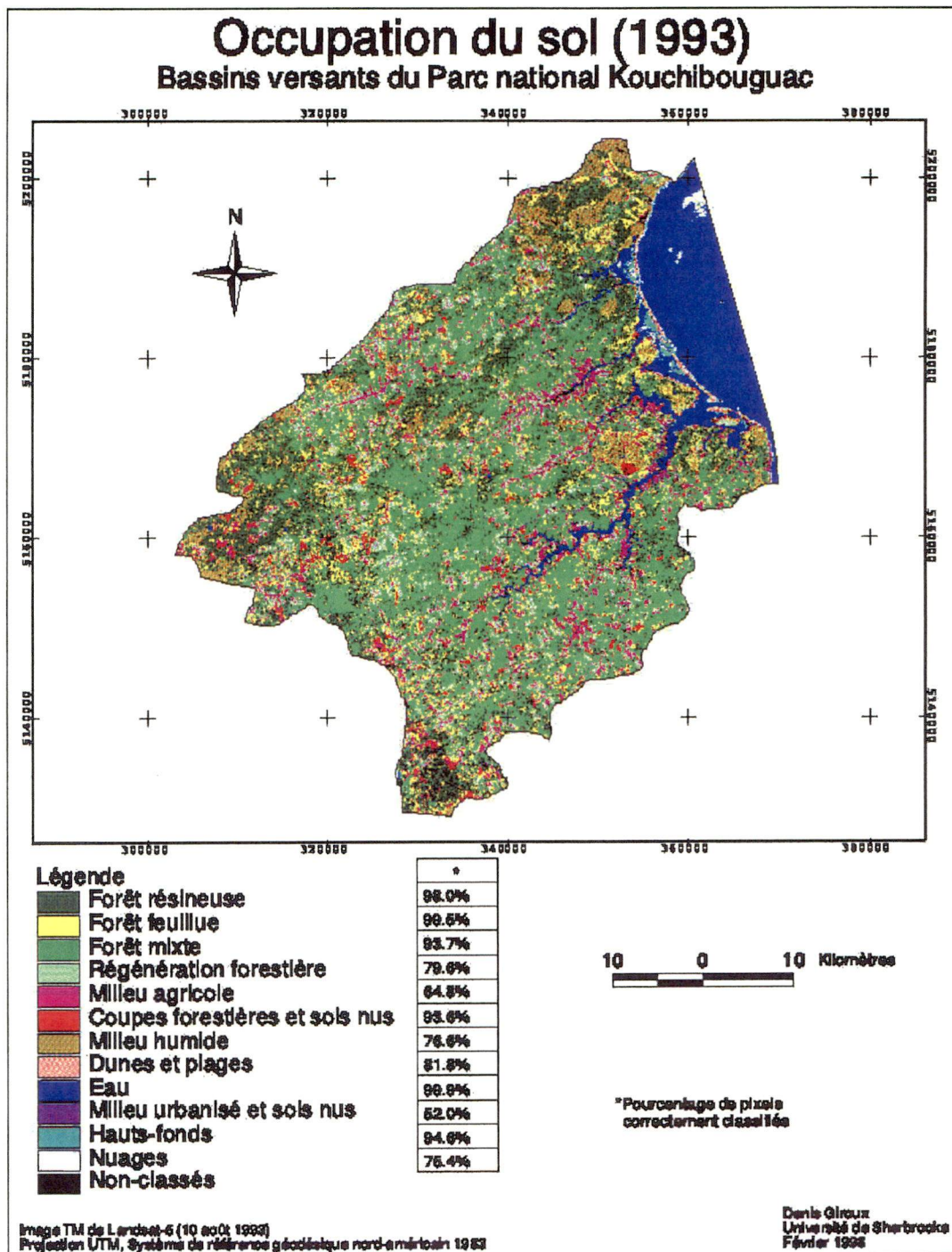


Figure 57 - Occupation du sol en 1993 (bassins versants du PNK). Toutes les classes.

Figure 58 - Occupation du sol en 1977 (à l'intérieur du PNK). Toutes les classes.

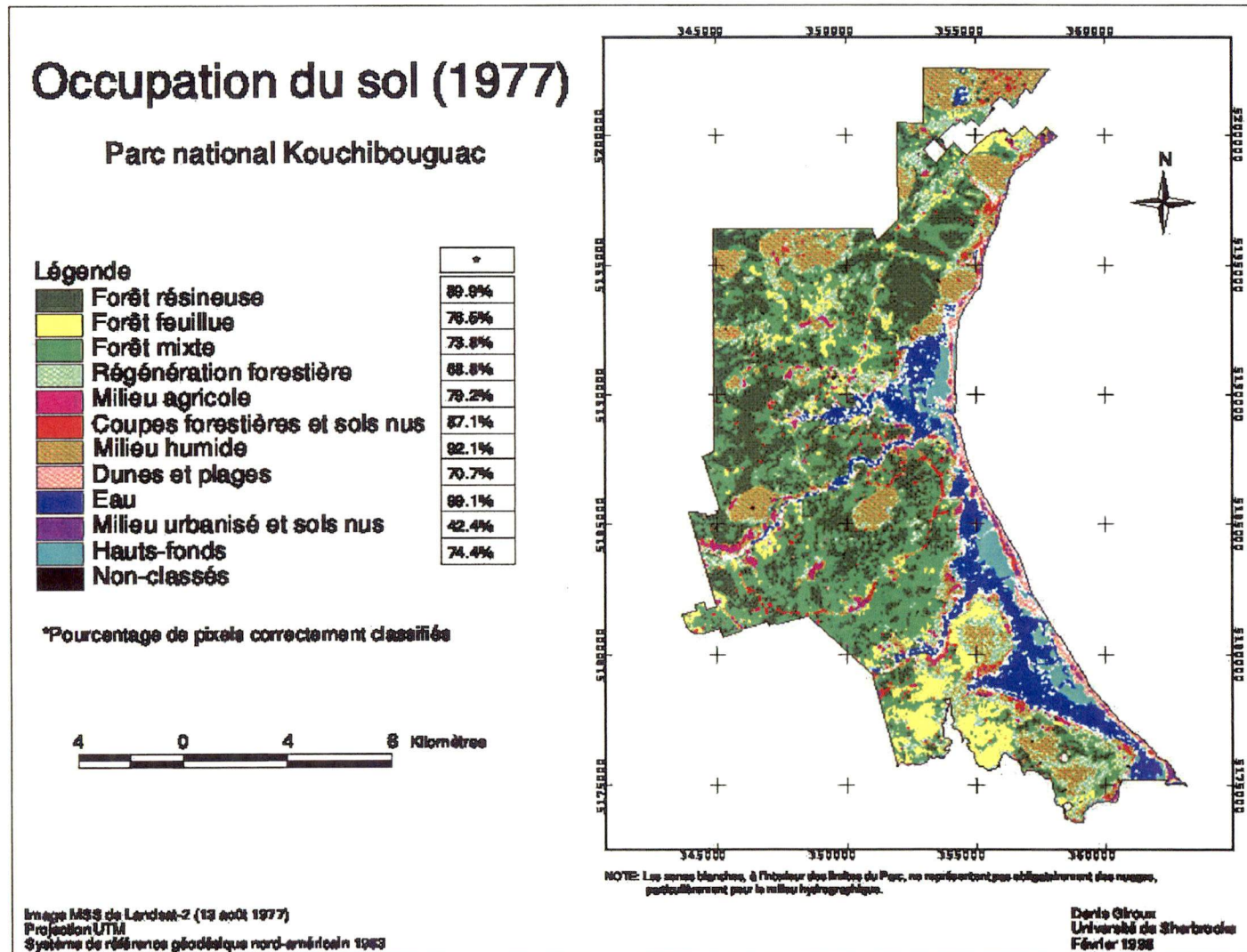
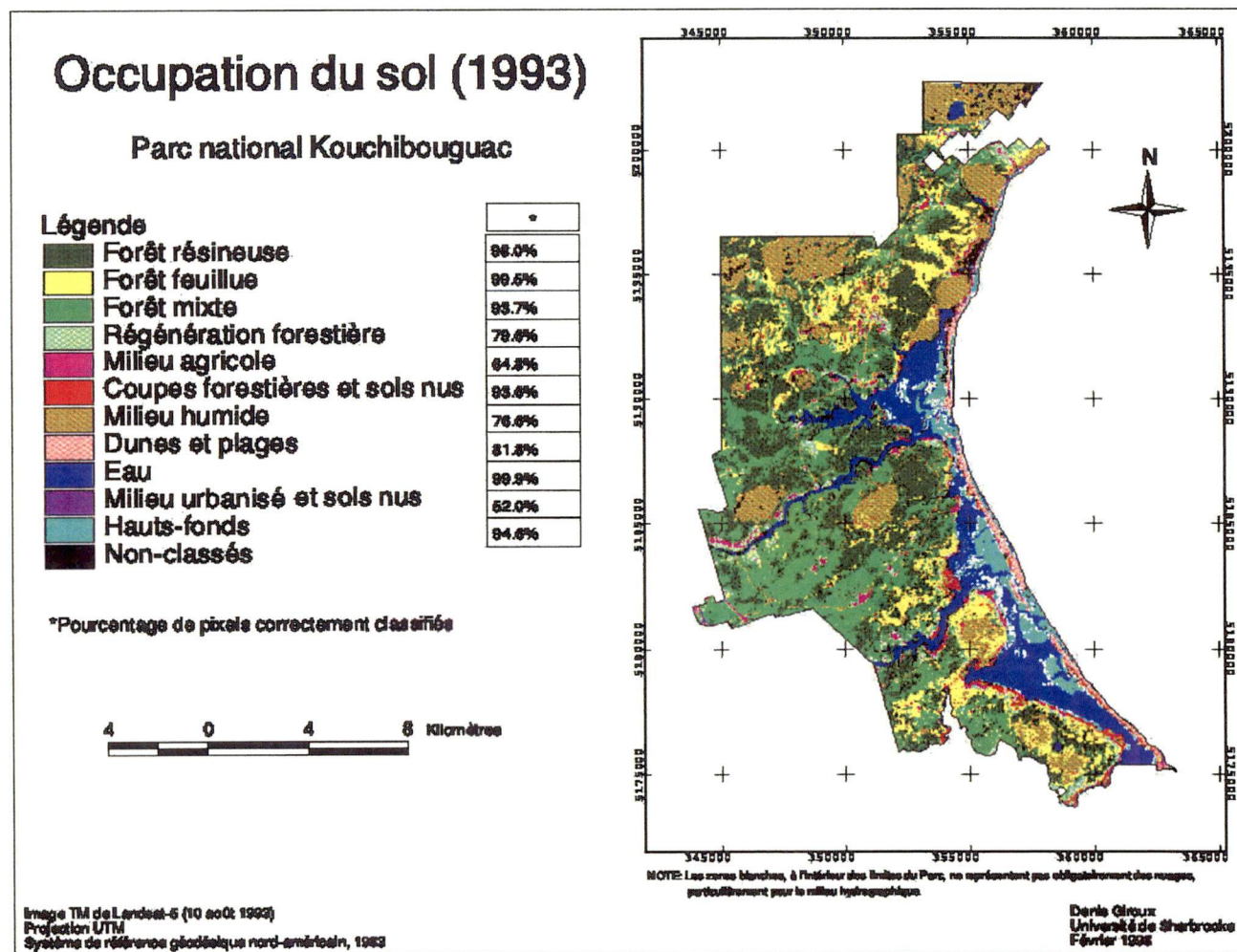


Figure 59 - Occupation du sol en 1993 (à l'intérieur du PNK). Toutes les classes.



Annexe 3

Cartes (grand format) des classifications finales des images-satellite MSS (1977) et TM (1993) de Landsat. Voir pochette.

Figures 60 et 61

Annexe 4

Carte (grand format) des zones de changements d'utilisation du sol (de 1977 à 1993)
à partir des images-satellite MSS (1977) et TM (1993) de Landsat. Voir pochette.

Figure 62

Annexe 5

Cartes (grand format) de la fragmentation des habitats pour les images-satellite MSS (1977) et TM (1993) de Landsat. Voir pochette.

Figures 63 et 64